



دانشکده :

مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

طراحی و شبیه سازی درایو موتور BLDC دوازده فاز

دانشجو :

حمید رضا غلامی

استاد راهنما :

دکتر علی دستفان

استاد مشاور :

دکتر محمد مهدی فاتح

شهریورماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به:

پدر و مادر فداکارم و همسر عزیزم که در تمام مدت، حضورشان موجب آرامش و امید در بنده گردید.

تشکر و قدردانی :

با پایان یافتن این پروژه وظیفه خود می‌دانم، نهایت سپاس و تشکر را از اساتید دلسوزم، جناب آقای دکتر دستفان و جناب آقای دکتر فاتح داشته باشم که در به ثمر رسیدن این پایان‌نامه نقش اساسی ایفا نمودند.

چکیده :

موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم جریان مستقیم^۱، با ولتاژ ضد محرکه الکتریکی^۲ دوزنقه‌ای شکل به سرعت در حال به‌کارگیری در کاربردهای با عملکرد بالا، به دلیل ویژگی‌های برتری که این موتورها در مقایسه با موتورهای الکتریکی مرسوم دارند هستند. از ویژگی‌های برتر این موتورها می‌توان به بازده بالا، فرم فشرده، قابلیت اطمینان زیاد، گشتاور زیاد و هزینه نگهداری پایین اشاره کرد. این نوع از موتورهای الکتریکی اغلب در آرایش سه فاز مطرح و به‌کارگرفته می‌شود. استفاده از موتورهای BLDC سه فاز در صنایع حساس بویژه صنایع نظامی، مستلزم بهبود هر چه بیشتر شاخصه‌های عملکردی این موتورهاست. راهکارهای مختلفی در بهبود عملکرد این موتورها مطرح شده است از جمله می‌توان به بهینه‌سازی در روشهای کنترلی و افزایش تعداد فاز استاتور این موتورها را نام برد. موتورهای BLDC با تعداد فاز بالاتر گزینه‌ای است که در صنایع نظامی به عنوان نیروی پیشران در شناورهای زیرسطحی بسیار مورد توجه است. موتورهای BLDC چند فاز مزایای زیادی نسبت به موتورهای BLDC مرسوم، سه فاز دارا هستند؛ در این گونه از موتورهای BLDC، رپل گشتاور و سرعت بهبود می‌یابد، جریان هر فاز کاهش می‌یابد و قابلیت اطمینان در کارکرد بدون وقفه در کنار چگالی توان در هر فاز افزایش می‌یابد.

در این پایان‌نامه، طراحی و شبیه‌سازی درایو موتور BLDC دوازده فاز، بدون انتقال روابط میان پارامترهای موتور به دستگاه‌های مرجع شناخته شده شکل گرفته و شاخصه‌های عملکردی این موتور با بهره‌گیری از روش کنترل مستقیم سرعت به روش کنترل جریان و با استفاده از منطق فازی^۳، استخراج شده و با موتور مشابه BLDC سه فاز مقایسه شده است. از جمله نتایج حاصله از این مقایسه می‌توان به کاهش رپل سرعت و گشتاور، کاهش جریان موتور در هر فاز و افزایش محدوده کاری موتور در زمان وقوع خطای فاز در موتور BLDC دوازده فاز در قیاس با موتور BLDC سه فاز را نام برد.

کلمات کلیدی: موتور BLDC دوازده فاز، bEMF دوزنقه‌ای، کنترل سرعت، کنترل جریان، منطق فازی، کاهش

رپل سرعت و گشتاور

^۱ Permanent magnet Brushless DC motor (PMBLDC)

^۲ Back electro motive force (bEMF)

^۳ Fuzzy logic

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	فصل اول-مقدمه.....
۶	فصل دوم- ساختار موتور BLDC.....
۷	۱-۲ تعاریفی از موتور BLDC
۷	۲-۲-آشنایی با موتور BLDC
۸	۳-۲: روتور مغناطیس دائم
۱۱	۴-۲-ساختمان استاتور
۱۲	۴-۲-۱سیم پیچی در استاتور
۱۳	۴-۲-۲موتور BLDC با توزیع سیم پیچی سینوسی (PMSM).....
۱۴	۴-۲-۳موتور BLDC باتوزیع سیم پیچی متمرکز.....
۱۵	۴-۲-۴مقایسه موتور BLDC و موتور PMSM
۱۶	۵-۲ مقایسه موتور BLDC با موتور DC و القایی
۱۷	۶-۲کموتاسیون در موتور BLDC
۲۰	۷-۲موتورهای BLDC چند فاز
۲۲	۸-۲ مزایا و معایب موتور BLDC
۲۳	۹-۲کاربردهای موتور BLDC
۲۴	۱۰-۲مدل ریاضی موتور
۲۸	فصل سوم- روش های کنترل درایو BLDC.....
۲۹	۱-۳: تشخیص موقعیت روتور
۳۰	۱-۳-۱: تشخیص موقعیت روتور با حسگر
۳۲	۱-۳-۲: روش های تشخیص موقعیت روتور بدون حسگر
۳۴	۲-۳-روش های کنترلی درایو موتور BLDC
۳۵	۱-۲-۳-روش های کنترل کلاسیک
۳۶	۲-۲-۳-روش های کنترل هوشمند
۳۷	۳-۳-سیستم های فازی
۳۸	۱-۳-۳-پیکربندی یک سیستم فازی
۴۱	۴-۳-روش های کنترل موتور BLDC.....
۴۱	۱-۴-۳کنترل اسکالر
۴۲	۲-۴-۳کنترل برداری
۴۵	۵-۳-روش های کنترلی اینورترهای منبع ولتاژی
۴۶	۱-۵-۳ روش SPWM
۴۷	۲-۵-۳ روش PWM با نمونه برداری یکنواخت
۴۸	۳-۵-۳ روش PWM با حذف هارمونیک های انتخابی
۴۸	۴-۵-۳ روش SVPWM:
۵۲	۵-۵-۳ روش کنترل جریان HYSTERESIS

۵۳	.....BLDC راه اندازی موتور
۵۴	.....۱-۶-۳ راه اندازی حلقه باز
۵۴	.....۲-۶-۳ تخمین مکان اولیه روتور با تکنیک های مناسب
۵۵	.....۳-۶-۳ راه اندازی با ایجاد نقطه ای مشخص برای روتور
۵۶	فصل چهارم-درایو موتور BLDC، دوازده فاز و کنترل آن
۵۷	.....۱-۴ پیاده سازی روش کنترل سرعت درایو موتور BLDC دوازده فاز
۵۸	.....۲-۴ بلوک موتور
۶۲	.....۳-۴ مودهای عملکرد
۶۴	.....۴-۴ بلوک ولتاژ ضد محرکه (bEMF):
۶۶	.....۴-۴ بلوک جریان مرجع
۶۷	.....۴-۴ بلوک سرعت و وضعیت موتور
۶۹	.....۴-۴ بلوک کنترل سرعت
۷۱	.....۴-۴ بلوک کنترل جریان هیستریسیس
۷۳	فصل پنجم-نتایج شبیه سازی
۷۷	.....۱-۵ سرعت موتور
۸۲	.....۲-۵ گشتاور الکترومغناطیسی
۸۳	.....۳-۵ جریان استاتور و ولتاژ bEMF
۸۷	.....۴-۵ قابلیت پایداری در برابر خطا
۹۰	فصل ششم- نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۱	.....۱-۶ نتیجه گیری
۹۲	.....۲-۶ پیشنهادات

فهرست شکل‌ها:

شکل ۱-۲	: درایو موتور BLDC	۸
شکل ۲-۲	: آهنربای مغناطیس دائم روی سطح خارجی روتور	۹
شکل ۳-۲	: آهنربای مغناطیس دائم روی سطح داخلی روتور	۱۰
شکل ۴-۲	: آهنربای مغناطیس دائم روتور به فرم شعاعی	۱۰
شکل ۵-۲	: حلقه B_H ماده مغناطیسی	۱۰
شکل ۶-۲	: استاتور یک موتور BLDC	۱۲
شکل ۷-۲	: موتور BLDC با آرایش سیم پیچی توزیع شده	۱۴
شکل ۸-۲	: موتور BLDC با آرایش سیم پیچی متمرکز	۱۵
شکل ۹-۲	: درایو موتور BLDC سه فاز	۱۸
شکل ۱۰-۲	: کموتاسیون الکتریکی در یک موتور BLDC سه فاز	۱۹
شکل ۱۱-۲	: ترتیب تحریک سیم پیچ‌ها با توجه به موقعیت روتور یک موتور BLDC سه فاز	۲۰
شکل ۱۳-۲	: مدار معادل یک موتور BLDC سه فاز [۲۳]	۲۵
شکل ۱-۳	: نحوه قرارگیری حسگرهای اثر هال در استاتور موتور BLDC	۳۲
شکل ۲-۳	: ولتاژهای فیلتر شده ترمینال موتور در روش PWM	۳۳
شکل ۳-۳	: ولتاژهای ضد محرکه و ارتباط آن‌ها با کموتاسیون فاز	۳۴
شکل ۴-۳	: ساختار کلی سیستم استنتاج فازی	۳۸
شکل ۵-۳	: توابع عضویت در MATLAB / SIMULINK	۴۰
شکل ۶-۳	: قاعده ی روش pwm مبتنی بر موج حامل مثلثی	۴۶
شکل ۷-۳	: روند شکل گیری موج مدولاسیون به روش نمونه برداری یکنواخت	۴۷
شکل ۸-۳	: بردار فضایی یک سیستم سه فاز	۴۸
شکل ۱۳-۳	: روش هیستریزس برای یک فاز موتور	۵۳
شکل ۱-۴	: بلوک دیاگرام روش کنترل سرعت درایو BLDC	۵۸
شکل ۲-۴	: مدار معادل با موتور BLDC سه فاز	۵۹
شکل ۳-۴	: مدار معادل موتور BLDC دوازده فاز	۶۱
شکل ۴-۴	: مدل موتور دوازده فاز در محیط شبیه سازی	۶۲
شکل ۵-۴	: ولتاژهای bEMF در موتور دوازده فاز	۶۴
شکل ۶-۴	: بلوک تولید کننده ولتاژهای ضد محرکه فازها برحسب وضعیت روتور	۶۵
شکل ۷-۴	: ارتباط میان جریان موتور و ولتاژ bEMF	۶۷
شکل ۸-۴	: روند دستیابی به سرعت (ω_r) و وضعیت موتور (θ_r)	۶۸
شکل ۹-۴	: محاسبه دامنه جریان مرجع	۶۹
شکل ۱۰-۴	: توابع عضویت خطای سرعت و تغییرات خطای سرعت کنترل کننده فازی	۷۰
شکل ۱۱-۴	: توابع عضویت خروجی کنترل کننده فازی	۷۰
شکل ۱۲-۴	: منحنی سه بعدی سطح، کنترل کننده فازی	۷۱
شکل ۱۳-۴	: مدولاسیون هیستریزس در کنترل سرعت موتور BLDC	۷۲
شکل ۱۴-۴	: روش مدولاسیون جریان هیستریزس	۷۲
شکل ۱-۵	: تغییرات موقعیت روتور	۷۶

۷۶	شکل ۵-۲: تغییرات موقعیت روتور در محدوده $0 - 2\pi$
۷۸	شکل ۵-۳: سرعت مکانیکی موتور.....
۷۹	شکل ۵-۴: نوسانات سرعت موتور BLDC پیش از اعمال پله ی بار.....
۸۰	شکل ۵-۵: نوسانات سرعت موتور BLDC پس از اعمال پله ی بار.....
۸۱	شکل ۵-۶: عملکرد حلقه ی کنترل سرعت موتور BLDC.....
۸۳	شکل ۵-۷: نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی در موتور BLDC.....
۸۵	شکل ۵-۸: ولتاژهای bEMF.....
۸۷	شکل ۵-۹: جریان استاتور.....
۸۸	شکل ۵-۱۰: خطای فاز در موتور BLDC.....

فهرست جداول

۱۶	جدول ۱-۲ : مقایسه موتور BLDC با موتورهای DC جاروبک دار و القایی.....
۶۳	جدول ۱-۴ : مودهای عملکرد برای جریان فازهای موتور.....
۷۵	جدول ۱-۵ : مشخصات درایو موتور BLDC دوازده فاز.....
۷۵	جدول ۲-۵ : مشخصات موتور BLDC سه فاز.....

فصل اول :

مقدمه

امروزه، موتورهای الکتریکی در سطح بسیار وسیعی در تمامی صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد و اکثر تجهیزات به انواع مختلف موتورهای الکتریکی تجهیز شده‌اند. اگر کمی به اطراف بنگریم، خواهیم دید که در انبوهی از این وسائل احاطه شده‌ایم که البته حضور این تکنولوژی موجب سهولت در زندگی روزمره شده است.

امروزه محدودیت‌های اقتصادی و استانداردهای وضع شده توسط دولت‌ها به شدت روی سیستم‌های الکتریکی اثر گذاشته است. تولیدات جدید باید کارایی بیشتر، بازده بهتر و کاهش اختلالات الکترومغناطیسی را به همراه داشته باشند. انعطاف پذیری سیستم‌ها باید زیاد شود تا زمان به روز کردن محصولات کاهش پیدا کند. همچنین در سالهای اخیر استانداردهای جدید مصرف انرژی برای صنایع پیشنهاد داده شده که در آینده نزدیک به صنایع تحمیل خواهد شد. صنایع باید همزمان با برآورده کردن این مسائل قیمت سیستم‌ها را نیز کاهش دهند.

موتورهای کلاسیک (انواع DC و AC) به مدت طولانی است که در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. ماشین‌های DC جاروبک دار مرسوم، به دلیل مشخصات پایانه‌ای خوب، بسیار مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ وجود جاروبک‌ها و کموتاسیون، نیاز به رفع عیب و صرف هزینه‌های نگهداری و ایجاد جرقه در جاروبک‌ها در زمان کموتاسیون از معایب این نوع از موتورها می‌باشد.

موتورهای AC نیز در سطح وسیع و در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گرفته و می‌گیرد از مهمترین مزایای این موتورها بر موتورهای DC عدم وجود جاروبک و بازده بالاتر را می‌توان نام برد. تا قبل از پیدایش تکنولوژی عناصر نیمه هادی و کاربرد آن در کنترل دور موتورهای AC، این موتورها اغلب در کاربردهایی با دور ثابت بکارگرفته می‌شده است. البته در گذشته با به کارگیری تکنیک‌هایی، دور این موتورها تغییر داده شده است که به دلیل محدودیت‌های این روش‌ها، مقرون به صرفه نبودن و بازدهی پایین آنها، استفاده از این موتورها را با چالش مواجه می‌سازد.

در اواخر سال ۱۹۵۰ با ورود تریستور به بازار، به سرعت در یکسو کننده‌ها به منظور تنظیم سرعت موتورهای DC به کار گرفته شد، و در اوایل دهه‌ی ۶۰ اینورترهای مجهز به عناصر نیمه هادی جای پای خود را در تنظیم سرعت موتورهای AC باز نمود [۲].

پیشرفت در تکنولوژی تولید سوئیچ‌های نیمه هادی و میکروپروسورها سبب ایجاد درایوهای کنترل سرعت به واسطه بهره‌گیری از مبدل‌های قدرت و شکل‌گیری کموتاسیون الکتریکی به جای کموتاسیون مکانیکی شده است. تلفیق این کموتاسیون الکتریکی در موتورهای کلاسیک مرسوم، ساختار جدیدی در موتورهای الکتریکی ایجاد نموده است که دارای مشخصات پایانه‌ای مشابه با موتورهای DC است با این تفاوت که به لحاظ ساختاری مشابه با یک موتور سنکرون AC می باشد. این موتور با نام موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم^۱ شناخته می‌شوند.

برای نخستین بار، در سال ۱۹۶۲ دو مهندس به نام T.G. Wilson و P.H. Trickey مقاله‌ای منتشر نمودند که در آن موتور BLDC مطرح و معرفی شده بود؛ ولی مغناطیس دائم و سوئیچینگ قدرت دو عاملی بود که مانع از فراگیر شدن این تکنولوژی تا سال ۱۹۸۰ در صنعت شد. استفاده تجاری از این محصول در همین سال توسط کمپانی Powertec آغاز شد.

این موتورها به علت بازده بالا، فرم فشرده، قابلیت اطمینان زیاد، گشتاور زیاد و هزینه نگهداری پایین مورد توجه واقع شدند. اما پیچیده بودن روشهای کنترل و هزینه‌ی بالای درایوهای الکترونیکی مانع از گسترش کامل این موتورها شده است. هر چند تلاش محققین در دهه‌های اخیر روش‌های نوینی را در به کارگیری و کنترل این موتورها به وجود آورده که بسیاری از موانع و پیچیدگی‌های استفاده از این موتورها را از سر راه برداشته است [۳].

در این موتورها، جاروبک‌های مکانیکی که در موتورهای DC وجود داشتند حذف و با مبدل‌های قدرت مجهز به سوئیچ‌های نیمه هادی جایگزین شده و به منظور ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی، روتور به

^۱ Permanent magnet brushless dc motor(PMBLDC)

مغناطیس دائم مجهز شده است. این دسته از موتورها با توجه به ویژگی‌های خاصی که دارند در صنایع مختلف، از جمله صنایع نظامی صنایع خودروسازی، هواپیمایی، وسایل خانگی، صنایع الکترونیکی و چندین مورد دیگر به کار گرفته می‌شوند.

موتورهای PMBLDC چند فاز (تعداد فاز بیشتر از سه) ، به دلیل قابلیت تحمل خطا، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش ریپل گشتاور و کاهش جریان در هر فاز، در صنایع نظامی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از موتورهای چند فاز در شناورهای زیرسطحی به عنوان پیشران اشاره کرد [۴]-[۶].

افزایش قیمت تمام شده در درایو موتورهای BLDC، چند فاز و پیچیدگی‌های روش کنترل آن از جمله مواردی است که تا مدت‌ها مانع توسعه و به‌کارگیری این موتورها در صنعت می‌شده است. ولی تلاش محققین و پیشرفت تکنولوژی‌های کنترلی باعث به‌کارگیری روش‌هایی در جهت رفع این نقیصه شده است. از جمله این راه‌کارها می‌توان به استفاده از کنترل کننده‌های DSP، اشاره نمود که پیچیدگی‌های کنترلی را تا حد زیادی مرتفع ساخته است. استفاده از روش‌های تک قطبی جریان در تحریک استاتور نیز از جمله مواردی است که موجب کاهش تلفات و هزینه‌ها در سوئیچ‌ها شده است. از طرفی می‌توان بیان نمود که در صنایع‌های مانند صنایع نظامی و صنایع هوانوردی هزینه‌ای که این نوع موتورها بر پروژه تحمیل می‌نماید، در مقایسه با مزایای فراوانی که ارائه می‌دهند، ناچیز می‌باشد [۵].

در پایان نامه‌ی پیش روی در فصل اول مقدمه‌ای کلی از موضوع مورد بحث بیان شد ، در فصل دوم مفهوم کارکردی این موتور به همراه شرح ساختار این موتور و انواع آن اشاره خواهد شد، مزایای آن نسبت به موتورهای AC و DC بیان شده و کاربردهای آن در صنایع مختلف مرور می‌شود. در پایان مدل ریاضی معادل با موتورهای BLDC دوازده فاز و سه فاز ارائه می‌شود.

در فصل سوم، به دلیل اهمیت وضعیت روتور در شرایط کاری مختلف موتور ابتدا روش‌های دستیابی به موقعیت روتور مطرح شده و سپس روش‌های کنترل موتور BLDC مرور می‌شود، این روش‌ها در دو موضوع

روش‌های کنترل کلاسیک و روش‌های هوشمند مرور می شود. سپس روش‌های کنترلی موتور بیان شده و مزایا و معایب آن ارائه می‌شود و در ادامه روش‌های مدولاسیون اینورترهای منبع ولتاژ که به عنوان منبع تغذیه در درایو BLDC مورد استفاده قرار می‌گیرد، مرور خواهند شد و در پایان روش‌های راه اندازی موتورهای بدون جاروبک مرور شده است.

فصل چهارم به شرح و ارائه روش استفاده شده در کنترل سرعت موتور BLDC دوازده فاز می‌پردازد. در این فصل به بررسی جزء به جزء، حلقه‌ی کنترل سرعت موتور BLDC دوازده فاز و سه فاز با روش کنترل جریان و با استفاده از منطق فازی می‌پردازیم و نقش هر کدام از این اجزا و چگونگی پیاده سازی آن در محیط شبیه سازی برشمرده می شود. و نهایتاً در فصل پنجم نتایج حاصل از شبیه سازی موتور BLDC دوازده فاز و انواع سه فاز آن ارائه شده و این نتایج در بوته‌ی مقایسه قرار می‌گیرد. در این فصل شاخصه‌های عملکردی موتور از قبیل سرعت، گشتاور، سطح جریان استاتور و قابلیت اطمینان در کارکرد بدون وقفه‌ی این دو موتور مقایسه شده‌اند.

فصل دوم:

ساختار موتور BLDC

در این فصل به بررسی ساختار، اصول کاری و انواع موتور BLDC پرداخته، همچنین دلایل مورد توجه قرار گرفتن این موتور بررسی شده و در ادامه در مقام مقایسه‌ی ویژگی‌های این موتور نسبت به موتورهای مرسوم بر خواهیم آمد. در پایان مدل ریاضی معادل با موتورهای BLDC دوازده فاز و سه فاز ارائه می‌شود.

۱-۲ تعاریفی از موتور BLDC

موتورهای BLDC در مراجع مختلف دارای تعاریف متفاوتی می‌باشد. استاندارد انجمن ملی سازندگان تجهیزات الکتریکی (NEMA) موتور BLDC را این گونه معرفی می‌کند:

"یک موتور بدون جاروبک، ماشین دوار سنکرونی است که دارای روتور مغناطیس دائم بوده و از موقعیت‌های مشخصی از شفت دوار روتور، جهت کموتاسیون الکترونیکی استفاده می‌شود. این موتور می‌تواند همراه با درایورهای الکترونیکی مربوطه به صورت مجتمع یا این که موتور از درایور مربوطه جدا باشد."

KUSKO تعریف زیر را بیان می‌کند:

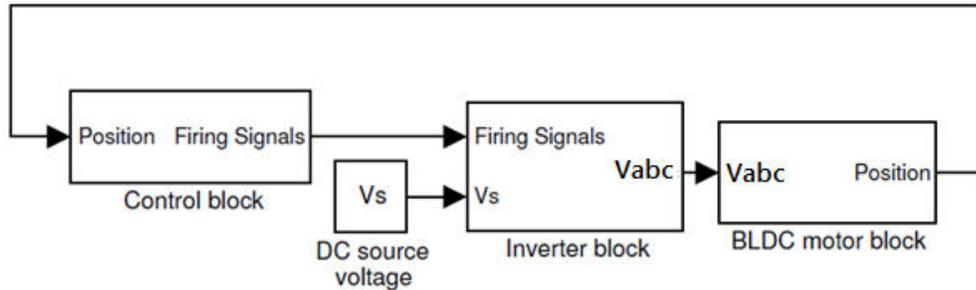
"یک موتور که دارای سیم پیچی استاتور بوده و یک روتور مغناطیس دائم برجسته از جنس آهن نرم دارد. سیم پیچ‌های استاتور از یک منبع تغذیه DC و توسط یک ماتریس از سوئیچ‌های حالت جامد تغذیه گشته و عمل کنترل با استفاده از حسگرهای وضعیت و با منطقی مشخص انجام می‌شود" [۱۰].

۲-۲-۲ آشنایی با موتور BLDC

موتور BLDC اساساً دارای ساختاری مشابه یک مغناطیس دائم دوار همراه با یک مجموعه از هادی‌های جریان می‌باشد، که برای ثابت ماندن جهت گشتاور در یک سو، جریان در هادی‌ها می‌بایست در هر زمان که یک قطب مغناطیسی از مقابل آن عبور کند، پلاریته‌اش نیز معکوس شود. در یک موتور DC، معکوس شدن پلاریته با کموتاتور و جاروبک‌ها انجام می‌شود. چون کموتاتور نسبت به روتور ثابت می‌باشد. لحظات سوئیچ‌زنی به طور اتوماتیک با تغییر پلاریته میدان مغناطیسی هادی‌ها سنکرون می‌شود. در یک موتور BLDC، معکوس شدن پلاریته با کلیدزنی ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌شود. روند کموتاسیون در هر

دو نوع ماشین، شبیه به هم بوده و سنکرون با وضعیت روتور می‌باشد. لذا معادلات دینامیکی مربوطه و مشخصه‌های سرعت-گشتاور آن‌ها نیز یکسان می‌باشند.

به مجموعه‌ی موتور سنکرون با روتور مغناطیس دائم، اینورتر و کنترل‌کننده، درایو گفته می‌شود. این مجموعه را در شکل ۱-۲ می‌توان دید.



شکل ۱-۲ : درایو موتور BLDC [۱۱]

همان‌گونه که می‌بینیم تغذیه موتور توسط یک اینورتر انجام می‌گیرد حال این‌که در چه زمانی کدام فاز در خروجی اینورتر قرار گیرد، وابسته به فرمان آتش ساخته شده توسط سیستم کنترلی اینورتر می‌باشد که البته خود این امر به روش کنترل موتور وابسته است. و در نهایت در روش کنترل موتور تعیین موقعیت روتور است، که مبدأ شکل‌گیری این چرخه‌ی کنترلی را شکل می‌دهد. در این مجموعه حسگرهای موقعیت‌یاب یا روش‌های تخمین، موقعیت روتور را تعیین می‌نمایند.

روتور، در موتور DC بدون جاروبک (BLDC) مجهز به مغناطیس دائم شده است. وجود این خاصیت در روتور، حضور جاروبک‌ها را حذف نموده و ساختار جدیدی را به وجود آورده است. برآیند میان میدان حاصل از آهنربای دائمی روتور و میدان حاصل از سیم پیچ‌های استاتور تحریک شده توسط اینورتر سبب ایجاد گشتاور در موتور می‌شود [۱۲].

۲-۳: روتور مغناطیس دائم

در موتور BLDC روتور یا از مغناطیس دائم ساخته شده است و یا به مغناطیس دائم تجهیز گردیده است، روتور می‌تواند از یک جفت قطب تا چندین جفت قطب را شامل باشد که قطب‌های N و S یک در

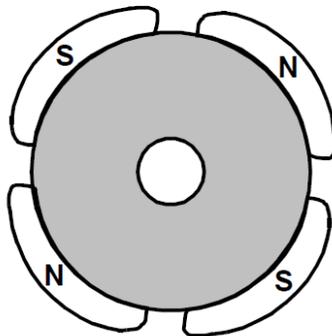
میان قرار گرفته‌اند. در بسیاری از روش‌های تخمین موقعیت از اثر همین قطب‌های مغناطیسی روی روتور و میدانی که هر قطب ایجاد می‌نماید به منظور تشخیص موقعیت روتور استفاده می‌کنند [۱۳].

قرار گیری مغناطیس دائم در روتور خود به چند روش انجام می‌شود

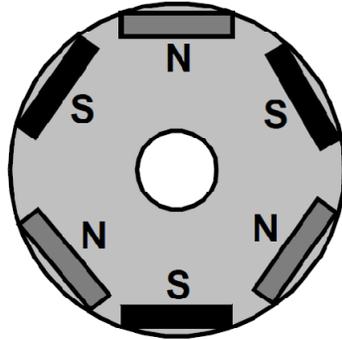
- مغناطیس دائم روی سطح خارجی روتور
- مغناطیس دائم روی سطح داخلی روتور
- مغناطیس دائم روی سطح داخلی به فرم شعاعی

در شکل ۲-۲ روتوری که مغناطیس دائم روی سطح خارجی آن قرار گرفته است مشاهده می‌شود، این-گونه قرار گیری مغناطیس دائم موجب می‌شود روتور حالت قطب برجسته داشته باشد و این موجب ایجاد گشتاور رلوکتانسی در موتور می‌شود.

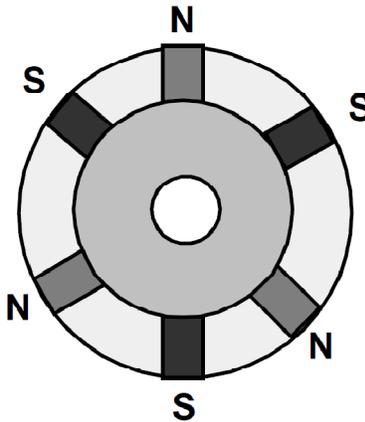
در شکل ۲-۳ مغناطیس دائم در سطح داخلی روتور قرار گرفته است. تفاوت این حالت با حالت قبلی در این است که روتور دیگر قطب برجسته نیست و به تبع آن دیگر گشتاور رلوکتانسی نیز وجود نخواهد داشت. در حالت سوم که مغناطیس دائم به صورت شعاعی درون روتور قرار می‌گیرد؛ در شکل ۲-۴ آورده شده است. لازم به توضیح است که موتور مجهز به این نوع روتور در سرعت‌های بالاتری می‌تواند به کار گرفته شود چرا که وجود آهنربای دائم در درون روتور به فرم شعاعی موجب عمر بالاتر روتور در سرعت‌های بالا می‌شود.



شکل ۲-۲: آهنربای مغناطیس دائم روی سطح خارجی روتور [۱۳]



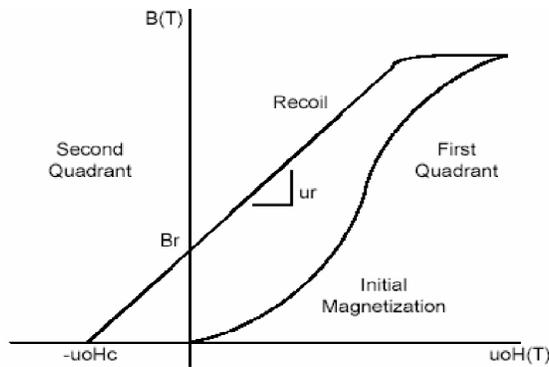
شکل ۲-۳: آهنربای مغناطیس دائم روی سطح داخلی روتور [۱۳]



شکل ۲-۴: آهنربای مغناطیس دائم روتور به فرم شعاعی [۱۳]

بسته به چگالی میدان مغناطیسی مورد نیاز، در روتور ماده‌ی مغناطیسی مناسب به منظور ساخت روتور انتخاب و به کار گرفته می شود

مواد مغناطیس دائم (PM) موادی هستند که دارای حلقه هیستریزیس پهن می باشند. منحنی عملکرد PM در ربع‌های اول و دوم حلقه هیستریزیس، در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۵: حلقه $B-H$ ماده مغناطیسی

حلقه‌ی هیستریزیس نمایش داده شده در شکل ۲-۵ با اعمال یک میدان مغناطیسی بسیار قوی و سپس قطع آن بر یک ماده خام مناسب به وجود می‌آید. این عملیات سبب می‌شود که مطابق منحنی، خاصیت مغناطیسی در ماده القا شود و یا این که ماده به حالت نخستین بازگردد. به طور مرسوم از هیدروکسید آهن (فریت مغناطیسی) برای ساخت مغناطیس دائم در روتور استفاده می‌شود.

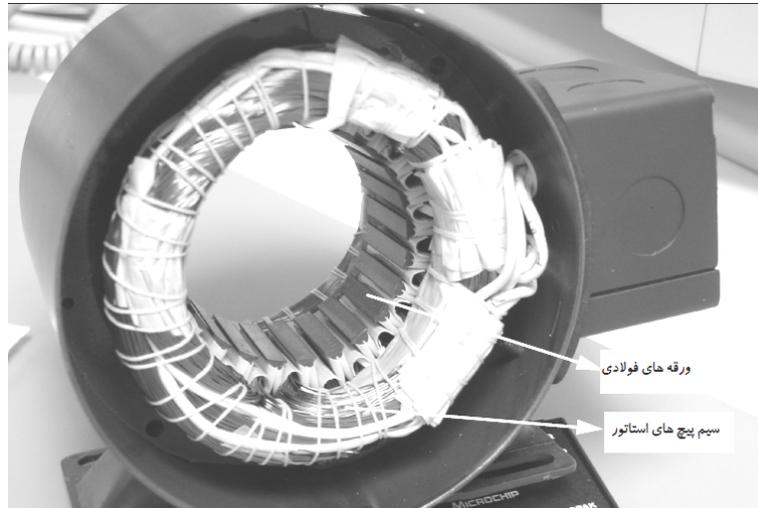
با پیشرفت تکنولوژی استفاده از آلیاژهای مغناطیسی نادر رواج یافته است. فریت مغناطیسی در رنج قیمت پایینی قرار دارد ولی چگالی شار پایینی ایجاد می‌کند، در حالی که آلیاژهای نادر چگالی شار بالاتری در حجم یکسان ایجاد می‌کنند، این مزیت سازنده را قادر می‌سازد حجم روتور را کاهش دهد، همچنین این آلیاژها نرخ سایش به وزن را بهبود داده و گشتاور بالاتری در مقایسه با همان حجم روتور فریت مغناطیسی ایجاد می‌نماید.

نئودیمیوم^۱ (Nd)، کبالت ساماریوم^۲ (SmCo) و آلیاژهای نئودیمیوم، فریت و برون^۳ (NdFeB) نمونه‌هایی از آلیاژهای نادر زمین هستند. البته هم‌چنان تحقیقات فراوانی به منظور فشرده سازی هر چه بیشتر روتور در جریان است [۱۱]، [۱۳].

۲-۴ ساختار استاتور

در موتور BLDC، استاتور از ورقه‌های فولادی در کنار هم قرار گرفته، ساخته شده است و سیم پیچی - های آن در شکافهایی به فرم محوری در سطح داخلی همان گونه که در شکل ۲-۶ آورده شده است قرار می‌گیرد.

^۱-Neodymium
^۲-Samarium Cobalt
^۳-Ferrite and Boron



شکل ۲-۶: استاتور یک موتور BLDC [۱۳]

در واقع استاتور موتور BLDC همانند استاتور در موتور القایی می باشد هر چند که توزیع سیم پیچی ها در این دو کمی متفاوت است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

اکثر موتورهای BLDC دارای سیم پیچ های استاتور سه فاز و اتصال سیم پیچ ها به فرم ستاره می باشند. این تعداد فازها می تواند با توجه به کاربرد موتور در موارد خاص افزایش داشته باشد، افزایش تعداد فازها و به تبع آن افزایش تعداد سیم پیچ های استاتور، ویژگی های قابل ملاحظه ای در ساختار موتور ایجاد می نماید که این موتور را برای صنایع حساس مورد توجه قرار می دهد.

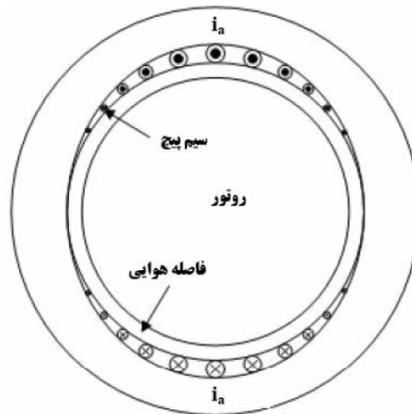
۲-۴-۱ سیم پیچی در استاتور

دو نوع سیم پیچی در استاتور موتور DC بدون جاروبک می تواند وجود داشته باشد: ۱- آرایش سیم پیچی توزیع شده (سینوسی) ۲- آرایش سیم پیچی متمرکز (دوذنقه ای) در حقیقت این دو نوع آرایش هر کدام در صورت استفاده در ساختمان استاتور می تواند یک نوع از موتور DC بدون جاروبک را شکل دهد.

۲-۴-۲ موتور BLDC با توزیع سیم پیچی سینوسی (PMSM)^۱

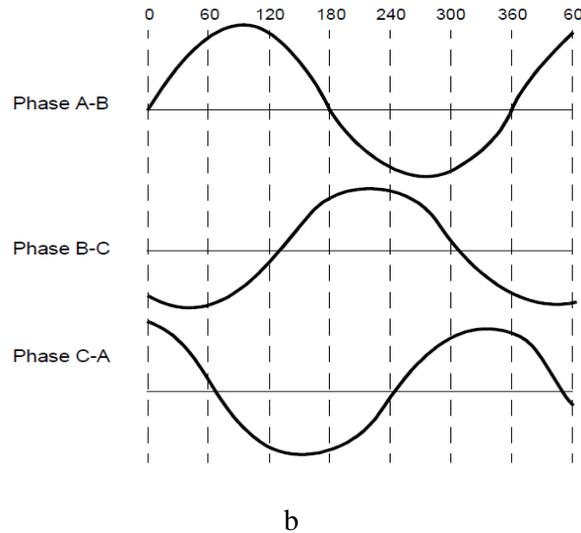
در این موتور DC بدون جاروبک، توزیع مکانی سیم پیچ‌های هر فاز استاتور به صورت توزیع شده‌ی سینوسی می باشد. این نوع توزیع سیم پیچی در استاتور موجب می شود ولتاژ القا شده از روتور مغناطیس دائم روی استاتور که با نام ولتاژ ضد محرکه الکتریکی^۲ شناخته می شود به فرم سینوسی باشد [۱۴].

در شکل ۲-۷ توزیع سینوسی سیم پیچ، در محیط استاتور موتور BLDC و bEMF سینوسی ایجاد شده در سیم پیچ‌های استاتور یک موتور BLDC سه فاز قابل مشاهده است. تولید bEMF سینوسی در استاتور ایجاد می نماید جریان فاز در استاتور نیز سینوسی شود این بدان معنی است که ولتاژ اعمالی به فازهای استاتور نیز می بایست سینوسی باشد [۱۵]، [۱۳]، [۱۱]. در حقیقت می توان گفت این موتور یک موتور BLDC با تغذیه سینوسی می باشد، که با نام BLAC نیز شناخته می شود.



a

^۱ Permanent magnet synchronous motor
^۲ -Back electromotive force (Bemf)



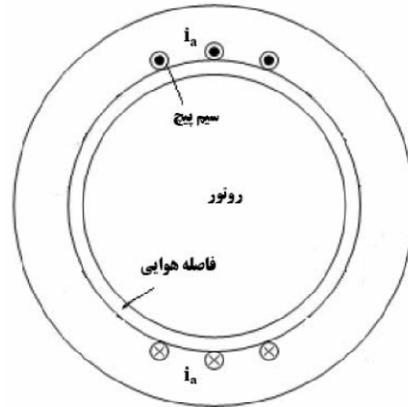
شکل ۲-۷: موتور BLDC با آرایش سیم پیچی توزیع شده

(a) آرایش سیم پیچی در یک فاز استاتور (b) bEMF ایجاد شده در استاتور

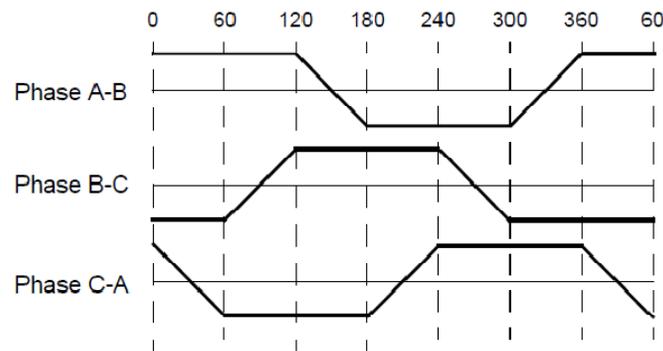
۲-۴-۳ موتور BLDC با توزیع سیم پیچی متمرکز

در موتور BLDC با توزیع متمرکز، توزیع مکانی سیم پیچ‌های هر فاز در استاتور به صورت متمرکز می‌باشد. این آرایش در سیم پیچ‌های استاتور، ولتاژ ضد محرکه الکتریکی ذوزنقه‌ای توسط روتور مغناطیس دائم ایجاد می‌نماید. در این ساختار به منظور ایجاد گشتاوری با نوسان‌های پایین‌تر در خروجی، جریان کشیده شده از استاتور به صورت شبه مربعی می‌باشد. این ولتاژ ضد محرکه ذوزنقه‌ای موجب می‌شود که اندوکتانس متقابل میان روتور و استاتور غیر سینوسی شود [۱]، [۷]، [۱۵].

در شکل ۲-۸ توزیع متمرکز سیم پیچ در محیط استاتور و bEMF ذوزنقه‌ای ایجاد شده در سیم پیچ‌های استاتور یک موتور BLDC سه فاز قابل مشاهده است.



a



b

شکل ۲-۸: موتور BLDC با آرایش سیم پیچی متمرکز

(a) آرایش سیم پیچی متمرکز در یک فاز استاتور (b) bEMF ایجاد شده در استاتور

۲-۴-۴ مقایسه موتور BLDC و موتور PMSM

- (۱) به دلیل وجود bEMF و جریان سینوسی در سیم پیچ‌های استاتور در موتور PMSM گشتاور حاصل دارای نوسانات پایین‌تر و ملایم‌تری نسبت به موتور BLDC می‌باشد.
- (۲) توزیع سینوسی سیم پیچ‌ها در شیارهای استاتور موتور PMSM، تعداد اتصال‌های داخلی بیشتری را در سیم پیچ‌ها موجب می‌شود که این یعنی افزایش مس مصرفی و به تبع آن افزایش قیمت تمام شده را در موتور PMSM نسبت به موتور BLDC به دنبال خواهد داشت [۱۳].

۳) تعیین موقعیت روتور در موتور PMSM نیازمند به روش‌های دقیق‌تری می‌باشد، این امر علاوه بر آنکه کنترل موتور را پیچیده‌تر خواهد نمود، بلکه افزایش هزینه‌ها را در این موتور نسبت به موتور مشابه BLDC به دنبال خواهد داشت.

۲-۵ مقایسه موتور BLDC با موتور DC و القایی

در مقایسه با موتورهای DC جاروبک‌دار و موتور القایی، موتور BLDC برتری‌های زیادی داشته و البته دارای معایبی نیز هست. جدول ۱-۲ مقایسه موتور BLDC با موتور DC و القایی را نشان می‌دهد [۱۳].

جدول ۱-۲ : مقایسه موتور BLDC با موتورهای DC جاروبک دار و القایی

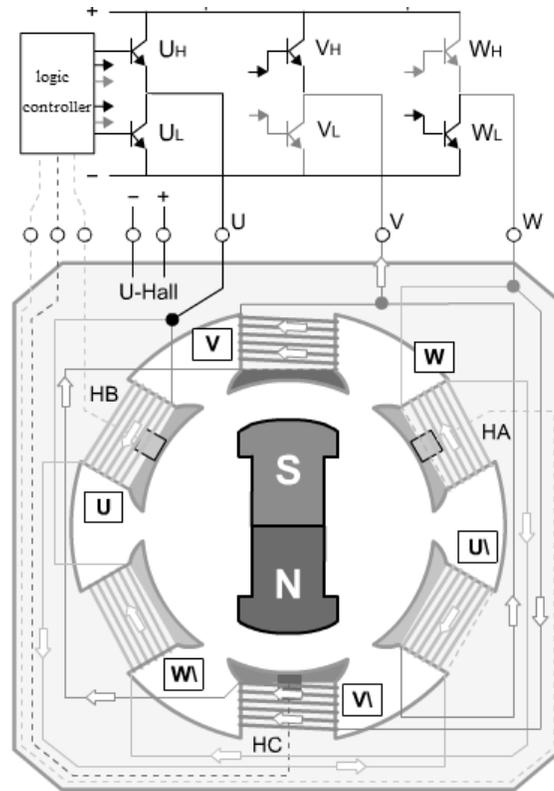
موتور BLDC	موتور DC جاروبک دار	موتور القایی	نوع موتور معیار
به صورت الکترونیکی و بر اساس وضعیت روتور	توسط جاروبک و کموتاتور	----	کموتاسیون
نگهداری کمتر به دلیل عدم وجود جاروبک	نگهداری دوره ای مورد نیاز است	نگهداری کمتر	نگهداری
طولانی تر	کوتاه تر	طولانی تر	عمر
بالاست، به دلیل وجود سیم پیچ‌ها در استاتور، تبادل گرمایی بهتری داشته و لذا موتور مشخصه گرمایی بهتری دارد و اندازه موتور می‌تواند کاهش یابد	متوسط به پایین، گرمای تولید شده توسط آرمیچر به فاصله هوایی منتقل شده، افزایش دمای فاصله هوایی، مقدار توان به سائز را کاهش می‌دهد	غیر خطی بوده و در سرعت‌های بالا گشتاور پایینتری را نتیجه می‌دهد	نسبت توان به اندازه
به دلیل مواد مغناطیسی روی روتور، اینرسی پایین بوده و لذا پاسخ دینامیکی بهتری دارد.	اینرسی روتور بالاتری داشته که پاسخ دینامیکی محدودی دارد	بالا بوده و مشخصه دینامیکی ضعیفی دارد	اینرسی موتور
بالاتر می‌باشد. هیچ محدودیت مکانیکی ندارد	به دلیل محدودیت‌های مکانیکی جاروبک‌ها، محدوده سرعت پایین تری دارد	----	محدوده سرعت
کم است	به دلیل وجود عمل کموتاسیون و جرقه‌های ناشی از آن نویز داریم	----	تولید نویز الکتریکی
به دلیل استفاده از مواد کمیاب، و سوئیچ‌های قدرتمند، بالاست	پایین است	خیلی پایین است	هزینه ساخت

کنترل	پیچیده و گران	ساده و ارزان	پیچیده و گران
نیازهای کنترلی	در سرعت ثابت هیچ کنترل کننده ای لازم نمی باشد ولی برای سرعت متغیر لازم است	در سرعت ثابت هیچ کنترل کننده ای لازم نمی باشد ولی برای سرعت متغیر لازم است	در سرعت ثابت هیچ کنترل کننده ای لازم نمی باشد ولی برای سرعت متغیر لازم است
جریان راه اندازی	تا ۷ برابر جریان نامی است و نیاز به مدار راه انداز داریم	----	در حد نامی بوده و نیازی به مدار راه انداز ندارد
لغزش	وجود داشته و با افزایش بار، لغزش زیاد می شود.	----	وجود ندارد

۲-۶ کموتاسیون در موتور BLDC

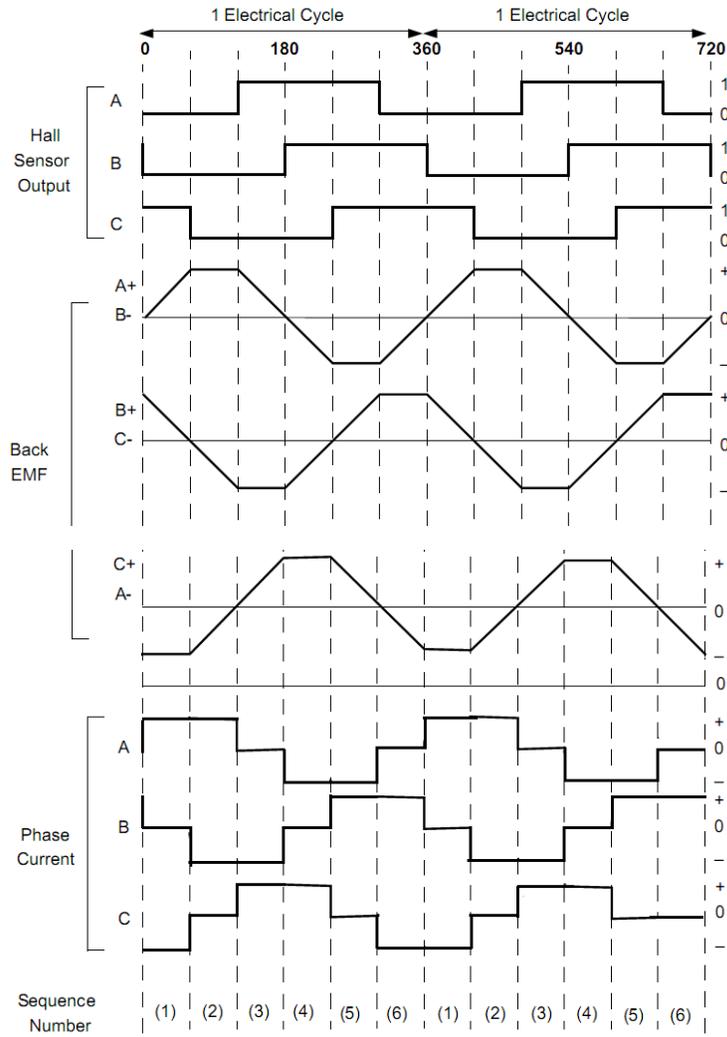
کموتاسیون در موتورهای DC به واسطه‌ی قطعات مکانیکی انجام می پذیرد؛ این عمل توسط جاروبک و کموتاتور صورت می گیرد؛ به کارگیری این قطعات پس از مدتی موجب استهلاک موتور شده و نیاز به تعمیر و صرف هزینه به منظور بهسازی را ایجاد می نماید. از طرفی این عمل با جرقه‌هایی همراه است که کارکرد موتور را در محیط‌های قابل اشتعال به مخاطره می اندازد. یکی از محاسن موتورهای BLDC نسبت به موتورهای مرسوم جایگزین شدن کموتاسیون مکانیکی با کموتاسیون الکتریکی می باشد.

به منظور درک بهتر این عمل در موتورهای BLDC، در ادامه عمل کموتاسیون الکتریکی در یک موتور BLDC، سه فاز دو قطب به صورت سلسله وار ارائه شده است. در شکل ۲-۹ یک درایو موتور BLDC، سه فاز که روند کموتاسیون آن با توجه به موقعیت روتور، در شکل ۲-۱۰ و ۲-۱۱ نشان داده شده، ارائه شده است.

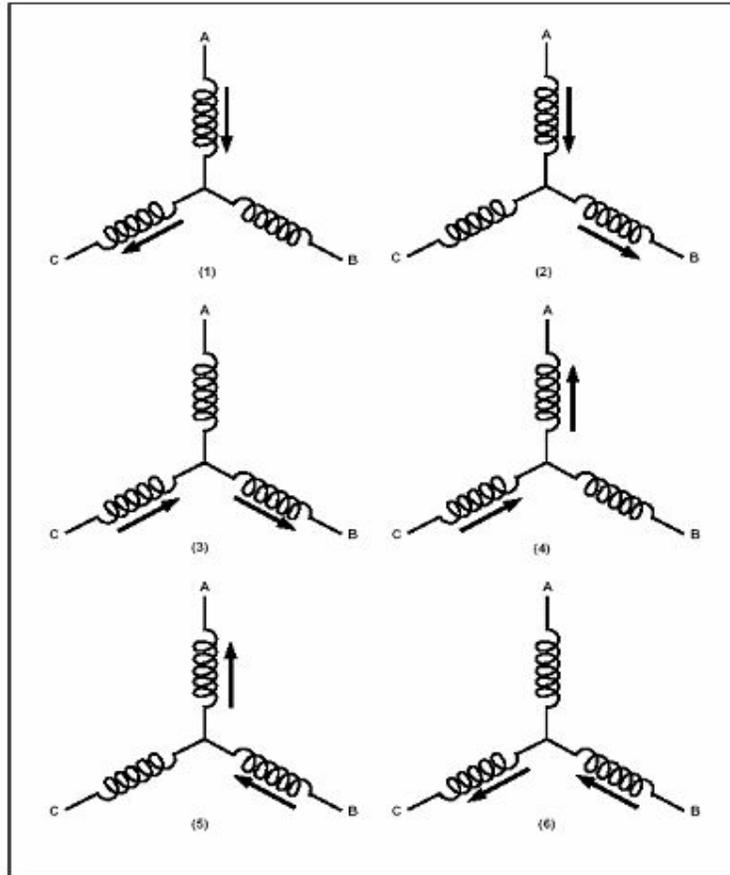


شکل ۲-۹: درایو موتور BLDC سه فاز

در شکل ۲-۱۱ ترتیب کلیدزنی در مبدل که با توجه به وضعیت روتور انجام می شود را نشان می دهد. در شکل ۲-۱۰ قابل مشاهده است که در هر ۶۰ درجه الکتریکی، یک حسگر هال تغییر وضعیت می دهد. با در نظر گرفتن این مطلب هر سیکل الکتریکی در ۶ پله تکمیل می شود. در این شکل وضعیت جریان و ولتاژ bEMF در هر بازه‌ی کموتاسیون قابل پیگیری است. شماره ترتیب کموتاسیون شکل ۲-۱۰ با شماره حالت های شش گانه در شکل ۲-۱۱ تطابق دارند.



شکل ۲-۱۰ : کموتاسیون الکتریکی در یک موتور BLDC سه فاز



شکل ۲-۱۱ : ترتیب تحریک سیم پیچ ها با توجه به موقعیت روتور یک موتور BLDC سه فاز

۲-۷ موتور های BLDC چند فاز

تعداد فاز در موتور های BLDC متناسب با کاربرد موتور و انتظاراتی که از آن می رود انتخاب می شود. این موتور می تواند تک فاز ، دو فاز، سه فاز، و یا تعداد بیشتری باشد. این نوع موتور به صورت مرسوم با سه فاز شناخته می شود و مورد بهره برداری قرار می گیرد. ولی تعداد بالاتر فازها در موتورهای BLDC ویژگی های برتری را به وجود آورده است و محققین را برای انجام تحقیقات گسترده تر در این زمینه ترغیب نموده است. از مهمترین برتری های موتورهای چند فاز در مقایسه با نمونه های مرسوم سه فاز می توان به موارد

زیر اشاره نمود [۴]-[۶]، [۸]، [۹]، [۱۶]-[۱۹].

- مقاوم بودن در برابر خطا (عملکرد بدون توقف)

- افزایش قابلیت اطمینان

- کاهش جریان هرفاز (کاهش جریان عبوری از هر سوئیچ) بدون افزایش ولتاژ در هر فاز
- کاهش نوسانات گشتاور
- افزایش در فرکانس نوسانات گشتاور
- افزایش نسبت گشتاور به جریان
- افزایش چگالی توان

موارد بالا موجب ورود این موتور در صنایع نظامی، هوانوردی، صنعت خودرو و دیگر صنایعی شده است که ویژگی‌های بالا از مهمترین پارامترهای مد نظر می باشد. از جمله کاربردهای مهم این نوع از موتورهای BLDC در صنایع نظامی می توان به استفاده از موتورهای چندفاز در شناورهای زیرسطحی به عنوان پیشران را نام برد [۴]-[۶].

البته در کنار تمامی محاسن ذکر شده، افزایش تعداد فاز مشکلاتی را نیز بوجود می آورد؛ از جمله این موارد می توان به پیچیده تر شدن مباحث کنترلی، افزایش تلفات و هزینه‌ها به دنبال افزایش در تعداد سوئیچ‌های درایو را نام برد. هر چند که با استفاده از کنترل کننده‌های DSP، پیچیدگی‌های کنترلی تا حد زیادی مرتفع شده و در مورد افزایش هزینه هم می توان بیان نمود که در صنایع ای مانند صنایع نظامی و صنایع هوانوردی هزینه‌ای که این نوع موتورها بر پروژه تحمیل می نماید در مقایسه با مزایای فراوانی که ارائه می دهند ناچیز می باشد [۵].

البته محققین روش‌های نوینی در جهت رفع این نقیصه ارائه داده و می دهند از جمله این روش‌ها می توان استفاده از روش‌های تک قطبی جریان در تحریک استاتور را نام برد. این روش‌ها موجب به کارگیری سوئیچ-های تک جهته و حذف دیود در ساختار درایو می شود که این امر موجب کاهش تلفات در سوئیچ‌ها شده است و قیمت تمام شده درایو BLDC را کاهش می دهد [۲۰]-[۲۲].

۸-۲ مزایا و معایب موتور BLDC

- **نویز پایین:** به دلیل عدم نیاز به هیچ گونه جاروبک مکانیکی یا حلقه‌های لغزان در موتورهای مغناطیسی دائم BLDC ، تمام نویزهای مکانیکی به استثنای نویزهای مربوط به بلبرینگ‌ها، کولپینگ‌ها و بار حذف می‌شوند.
 - **بهره بالا :** برای موتورهای BLDC ثابت شده است که بالاترین بهره را بین موتورهای موجود دارند. بهره بالاتر موتورهای BLDC در اصل به واسطه وجود میدان‌های مغناطیسی دائم موتور می‌باشد که میدانی پیوسته و ثابت بوده و مصرف توان الکتریکی ندارد. خصوصیات مهم دیگر مغناطیسی‌ها، طول عمر درازشان می‌باشد که تحت شرایط کاری مناسب، ضریب مغناطیسی زدایی پائینی دارند.
 - **کاهش ملزومات تحریک :** همان طور که اشاره گردید مغناطیسی‌های دائم یک میدان مغناطیسی ثابت ایجاد می‌کنند که بهره را با کاهش نیاز به ایجاد یک میدان مغناطیسی که در دیگر انواع موتورها لازم است، افزایش می‌دهند.
 - **نگهداری کم و طول عمر بیشتر :** چون هیچ جاروبک مکانیکی وجود ندارد و اثری هم از حلقه‌های لغزان نمی‌باشد، طول عمر موتور وابسته به طول عمر عایقی بلبرینگ‌ها و عمر مغناطیسی می‌باشد.
 - **ساختار مجتمع و متراکم :** کاربردهای هوا فضا و اتومبیل، نیاز به تجهیزات کم وزن و کوچک حجم دارد تا بهره سوخت را افزایش دهند و لذا نیاز به ذخیره سازی انرژی کمتری داشته باشند. اخیراً مواد مغناطیسی با دانسیته بالا مطابق با آنچه که در همین فصل مرور شد، به بازار مصرف عرضه شده که دانسیته انرژی ماشین را افزایش می‌دهد.
- با وجود مزایای ذکر شده، این موتورها دارای مشخصات و معایب ذاتی می‌باشند که عبارتند از :
- **قیمت مواد مغناطیسی :** قیمت‌های مواد مغناطیسی دائم با دانسیته انرژی بالاتر، مانع از استفاده از آن‌ها در کاربردهایی که قیمت و هزینه استفاده از این مواد بیشتر از ایجاد مزایای مذکور می‌باشد، می‌شود. به عنوان مثال سرامیک‌ها، کمترین قیمت را دارند و از طرفی دارای کمترین دانسیته انرژی نیز می‌باشند. مغناطیسی دائم از نوع نئودیمیم-آهن-بور بالاترین دانسیته انرژی را دارد که در حدود

سه برابر قیمت سرامیک می باشد. مگنت ساماریوم-کبالت، دانسیته انرژی قابل مقایسه‌ای داشته ولی در حدود ۶ برابر سرامیک، قیمت دارد.

• **احتمال مغناطیس زدایی :** در استفاده از مواد مغناطیس دائم باید مراقبت زیادی در برابر مقادیر بالای نیروی مغناطیس‌زدا و یا درجه حرارت‌های بالا که می‌توانند اثر مغناطیسی مگنت را از بین ببرند، به عمل آید.

علاوه بر موارد فوق می‌توان به خطرات ناشی از وقوع خطاهای اتصال کوتاه در مبدل برای سیم بندی‌های استاتور، اشاره کرد.

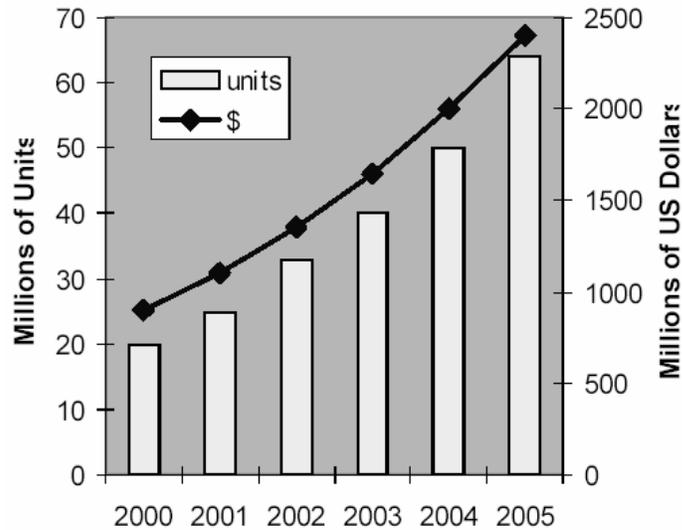
۲-۹ کاربردهای موتور BLDC

استفاده از موتورهای BLDC در صنایع هوا فضا ، صنایع نظامی، صنایع پزشکی، صنایع خودرو سازی، صنایع روباتیک، تولید وسایل خانگی و اتوماسیون صنعتی در سالهای اخیر به شدت رشد پیدا کرده است. از جمله موارد استفاده این موتورها در کاربردهای هوا فضا می‌توان به کنترل دریچه سوخت ، تنظیم آنتن خورشیدی ، کنترل گشتاور ژيروسکوپ، کنترل بازوهای روباتیک و سانتریفیوژ پمپ‌ها را نام برد.

در صنایع نظامی نیز این نوع موتور مورد توجه قرار دارد. از جمله این موارد می‌توان کاربرد آن در شناورهای زیرسطحی ، زیردریایی‌ها و کشتی‌های جنگی به عنوان نیروی محرک پیشران را نام برد [۵].

استفاده از موتور BLDC در وسایل خانگی نیز رو به افزایش است از جمله این موارد می‌توان ماشین لباسشویی، یخچال، جاروبرقی، فریزر، دستگاه تهویه مطبوع اتاق را نام برد

از دیگر کاربردهای این نوع موتور می‌توان به استفاده آن صنعت ابزار دقیق و صنایع کامپیوتری از جمله اسکنرها، تجهیزات اندازه گیری توسط لیزر، در DVD، CD، RAM ها، دیافراگم دوربین، سوپاپ‌های موتوری و ... اشاره نمود. نمودار (۱-۲) گسترش استفاده از این نوع موتور برای وسایل خانگی را تا سال ۲۰۰۵ نشان می‌دهد.



نمودار ۲-۱۲: گسترش استفاده از موتورهای BLDC در لوازم خانگی

۲-۱۰ مدل ریاضی موتور

در شبیه سازی‌ها به منظور بررسی عملکرد یک موتور باید مدلی از موتور در اختیار باشد. در مدل‌سازی‌های عملی باید خصوصیات و رفتار موتور را هر چه بهتر در مدل‌سازی دخیل کنیم. به منظور دستیابی به مدل هر چه دقیقتر می‌بایست خصوصیات موتور در غالب معادلات حاکم بر موتور آورده شود تا نتایج شبیه سازی دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر باشند.

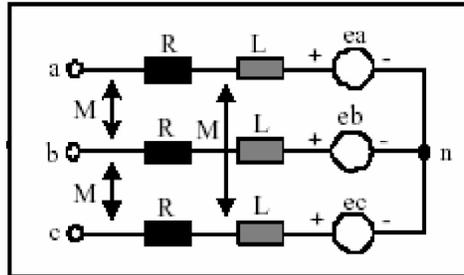
بدین منظور می‌بایست ابتدا تمام روابط و قوانین حاکم بر موتور استخراج شده و سپس این روابط با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی در نرم افزارهای مختلف، تبدیل به مدل موتور مورد نظر شود.

در این فصل مدل ریاضی یک موتور BLDC سه فاز و دوازده فاز با bEMF دوزنقه‌ای شکل را توصیف

می‌کنیم.

۲-۱۰-۱ مدل ریاضی موتور BLDC

در شکل (۱-۲) مدل گسترده‌ی یک موتور BLDC سه فاز نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳: مدار معادل یک موتور BLDC سه فاز [۲۳]

با در نظر گرفتن شکل ۲-۱۳ به عنوان مدل موتور BLDC، معادلات ولتاژ سیم پیچ استاتور موتور را به

صورت زیر می‌توانیم بنویسیم [۷]، [۲۴]:

$$V_a = R_a i_a + L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + e_a \quad (۱-۲)$$

$$V_b = R_b i_b + L_{ba} \frac{di_a}{dt} + L_{bb} \frac{di_b}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + e_b \quad (۲-۲)$$

$$V_c = R_c i_c + L_{ca} \frac{di_a}{dt} + L_{cb} \frac{di_b}{dt} + L_{cc} \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (۳-۲)$$

روابط بالا در فرم ماتریسی به صورت زیر خواهد بود

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{cb} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (۴-۲)$$

در روابط ۲-۱، ۲-۲، ۳-۲ داریم:

R_a, R_b, R_c مقاوت معادل سیم پیچ‌های استاتور در هر فاز .

I_c, I_b, I_a جریان‌های استاتور در هر فاز.

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} اندوکتانس‌های خودی سیم پیچ‌های استاتور

$L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ اندوکتانس‌های متقابل بین سیم پیچ‌های استاتور.

به‌علت غیر برجسته بودن روتور و تقارن سه فاز با تغییر زاویه، در رلوکتانس روتور تغییری ایجاد نمی‌شود.

همچنین اندوکتانس همه فازها متقارن فرض شده است.

در نتیجه :

$$R_a=R_b=R_c=R \quad (۵-۲)$$

$$L_{aa}=L_{bb}=L_{cc}=L \quad (۶-۲)$$

$$L_{ab}=L_{ba}=L_{ca}=L_{ac}=L_{bc}=L_{cb}=M \quad (۷-۲)$$

با در نظر گرفتن موارد ذکر شده می‌توانیم از معادله (۲-۴)، به معادله (۲-۸) برسیم.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + d/dt \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (۸-۲)$$

برای جریان های سه فاز در موتور BLDC بالانس داریم :

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (۹-۲)$$

$$\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} = 0 \implies \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} = -\frac{di_a}{dt} \quad (۱۰-۲)$$

از رابطه‌ی ۲-۱۰ می‌توان در ساده سازی معادلات حاکم بر موتور استفاده نمود در نتیجه با ساده کردن

معادله (۲-۸)، معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + d/dt \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (۱۱-۲)$$

گشتاور الکترو مغناطیسی تولید شده توسط موتور با معادله زیر بدست می‌آید که در آن ω برابر سرعت

زاویه ای موتور است:

$$T_e = \frac{1}{\omega r} [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c] \quad (۱۲-۲)$$

معادله ی حرکت موتور نیز به صورت زیر می باشد.

$$T_e = T_l + j \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (13-2)$$

که در آن ω_r سرعت زاویه‌ای موتور است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (14-2)$$

در رابطه‌ی ۲-۱۳، j ممان اینرسی ارجاعی به شفت روتور، B ثابت اصطکاک و T_l گشتاور بار می‌باشند.

فصل سوم:

روش‌های کنترل درایو BLDC

موتورهای مغناطیس دائم دارای ویژگی‌های کنترلی است که ایجاب می‌نماید وضعیت روتور به طور دقیق و صحیح در اختیار باشد از طرفی روش‌های کنترل درایو موتور BLDC، تعیین کننده کیفیت عملکرد آن است. به دلیل اهمیت این موضوع در این فصل به بررسی روش‌های تشخیص موقعیت روتور، استراتژی‌های کنترلی مرسوم و نوین در کنترل درایو موتور و اصول روش‌های کنترل درایو BLDC می‌پردازیم. در ادامه روش‌های کنترل اینورتر منبع ولتاژی به عنوان تغذیه موتور BLDC مرور شده و در پایان با روش‌های راه اندازی این موتور آشنا خواهیم شد.

۳-۱: تشخیص موقعیت روتور

در موتورهای با جاروبک عمل کموتاسیون به این دلیل که به صورت مکانیکی و مستقل از این که روتور در چه حالتی است به صورت متناوب در سیم پیچ‌ها صورت می‌گیرد اطلاع از موقعیت روتور نیاز نیست. حال آن‌که در درایو BLDC عمل کموتاسیون به فرم پیچیده‌تری شکل می‌گیرد، در درایو این موتور نکته‌ی کلیدی در شکل‌گیری کموتاسیون، تشخیص موقعیت روتور می‌باشد. در مکانیزم تولید گشتاور و داشتن گشتاور ثابت، تحریک فازها و ایجاد جریان در آن‌ها می‌باید سنکرون با وضعیت روتور انجام شود. لذا دانستن اطلاعات وضعیت زاویه‌ای روتور، یک امر اساسی برای کنترل درایو موتور BLDC است.

برای موتورهای BLDC نوع دوزنقه‌ای، عموماً از حسگرهای اثر هال برای تعیین وضعیت زاویه‌ای روتور استفاده می‌شود. برای درایوهای با عملکرد حساس، از اینکودرهای نوری و یا Resolverها نیز استفاده می‌شود که دقت بسیار بالایی دارند. با این وجود، استفاده از حسگرهای وضعیت مکانیکی در کاربردهای عملی با مشکلاتی همراه است [۲۵].

استفاده از حسگرهای الکترومکانیکی نه تنها هزینه و پیچیدگی سخت افزاری درایو را افزایش می‌دهد بلکه باعث کاهش استحکام و قابلیت اطمینان آن نیز می‌شود. از طرف دیگر، برای استفاده از قابلیت‌های سرعت بالای موتور، در طراحی موتور سعی بر آن است که طول محور روتور کوتاه باشد، در نتیجه تعبیه حسگر سرعت بر روی شفت موتور مشکل بوده و لذا وجود اینکودر بر روی شفت موتور باعث ایجاد

محدودیت در سرعت‌های بالا می‌شود. در کاربردهای تراکشن و خودروهای برقی، جانمایی حسگر سرعت نیز چندان راحت نیست. شرایط کاری آلوده، حرارت و وجود ارتعاشات مکانیکی زیاد با توجه به حساسیت حسگرهای وضعیت، سبب بروز مسائل عدیده‌ای می‌شوند. همچنین کابل‌های ارتباطی حسگرها با سیستم کنترل درایو، علاوه بر مسائل جانمایی و هزینه‌ای مربوطه، به راحتی تحت تاثیر میدان‌های الکترومغناطیسی قرار گرفته و مشکلات ثانویه‌ای ایجاد می‌کنند. بنابراین توصیه نمی‌شود که از حسگرهای وضعیت مکانیکی در کاربردهایی که از نظر فضا محدود و غیرقابل دسترس بوده، قیمت تمام شده مهم بوده و یا این‌که قابلیت بالای اطمینان سیستم مورد نظر است، استفاده شود. مشکلات فوق سبب شده است تا محققین رو به روش‌های تخمین وضعیت روتور بیاورند و تحقیقات متعددی را به پیش [۲۶].

به طور کلی تشخیص موقعیت روتور مبتنی بر دو روش می‌باشد:

(۱) روش‌های موقعیت یاب با استفاده از حسگر

(۲) روش‌های موقعیت یاب بدون استفاده از حسگر

۳-۱-۱: تشخیص موقعیت روتور با حسگر

حسگر هال

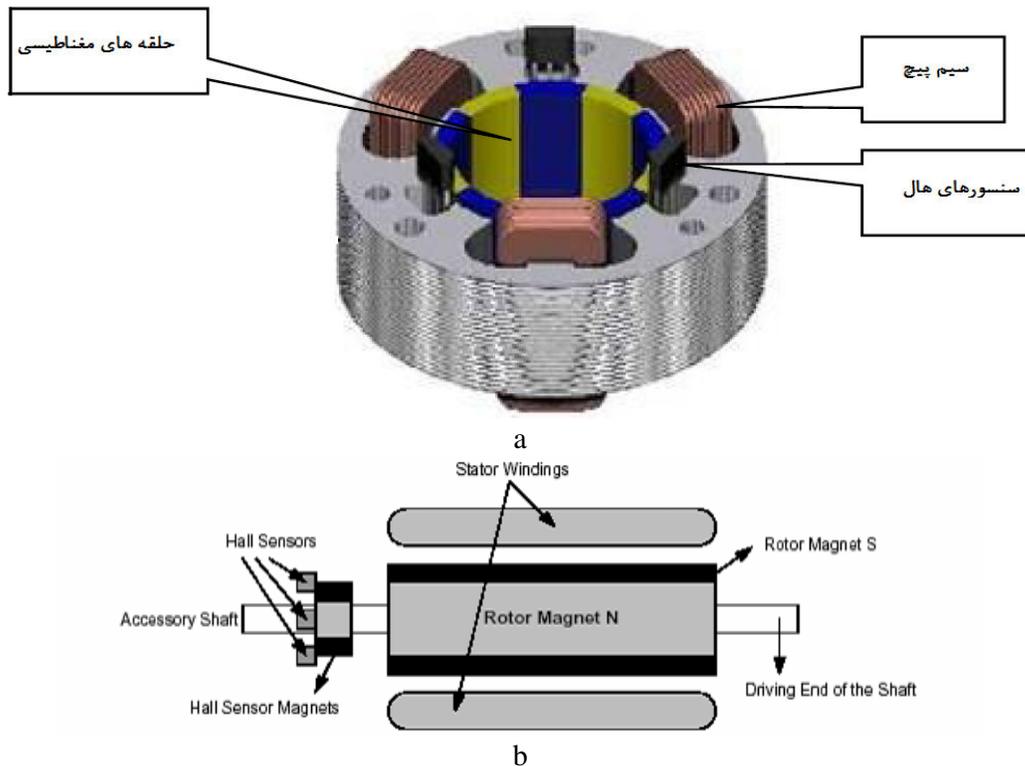
در سال ۱۸۷۹ یک فیزیکدان بنام هال موفق به کشف پدیده‌ای شد که به نام خودش نام‌گذاری شد. طبق این اثر وقتی که یک نیمه رسانا در یک میدان مغناطیسی قرارگیرد در جهت عمود بر میدان ولتاژی روی این نیمه رسانا ایجاد می‌شود. این ولتاژ به نام ولتاژ هال معروف است. از این پدیده‌ی فیزیکی برای ساخت حسگر هال استفاده می‌شود.

برخلاف موتور DC جاروبک دار، کموتاسیون یک موتور BLDC به صورت الکترونیکی صورت می‌گیرد. برای چرخش موتور، سیم پیچ‌های استاتور بایستی با ترتیبی مناسب تحریک شوند. برای تحریک سیم پیچ‌های استاتور، دانستن وضعیت روتور بسیار اهمیت دارد. وضعیت روتور در روش‌های تشخیص موقعیت روتور با حسگر، معمولاً توسط حسگر اثر هال جاسازی شده در استاتور تعیین می‌شوند. در این روش در

ساختار درایو BLDC، چندین حسگر هال قرار می‌گیرد. هر زمان که قطب‌های مغناطیسی روتور از نزدیکی یک حسگر هال عبور می‌نمایند یک سیگنال High یا Low که مبین عبور یک قطب N یا S از نزدیکی حسگر می‌باشد ایجاد می‌نمایند بر اساس ترکیب سیگنال‌های ایجاد شده توسط این حسگرها، ترتیب دقیق کموتاسیون قابل تعیین است [۱۳].

شکل ۱-۳ نحوه‌ی قرارگیری حسگرهای هال در یک موتور BLDC را نشان می‌دهد. جاسازی حسگر هال بر روی استاتور فرآیند ساده‌ای نمی‌باشد زیرا غیر هم محور بودن حسگرها نسبت به مگنت‌های روتور منجر به ایجا خطا در تعیین وضعیت روتور می‌شود. برای سهولت عمل جاسازی حسگرهای هال بر روی استاتور از سه عدد مگنت کوچک بر روی روتور استفاده می‌شود. که این مگنت‌ها نزدیک به حسگر هال قرار دارند. بر اساس مکان فیزیکی، حسگرهای هال دو نوع آرایش وجود دارد: الف) بین سیم پیچ‌های استاتور ب) روی قطب‌های استاتور. از معایب استفاده از این حسگرها می‌توان افزایش هزینه سیستم و افزایش اندازه موتور را نام برد. همچنین برای سوار کردن حسگرها ترتیب مکانیکی خاصی لازم است. و در بعضی از کاربردها امکان سوار کردن حسگرها روی موتور وجود ندارد.

مسئله دیگر حساس بودن حسگرهای هال به دما است. این حسگرها باید در دمای زیر ۷۵ درجه سانتیگراد کار کنند. همچنین سیم کشی‌هایی که برای این حسگرها لازم است قابلیت اطمینان سیستم را کاهش می‌دهد. بنابراین در سال‌های اخیر، کنترل بدون حسگر مورد توجه قرار گرفته است [۲۷].



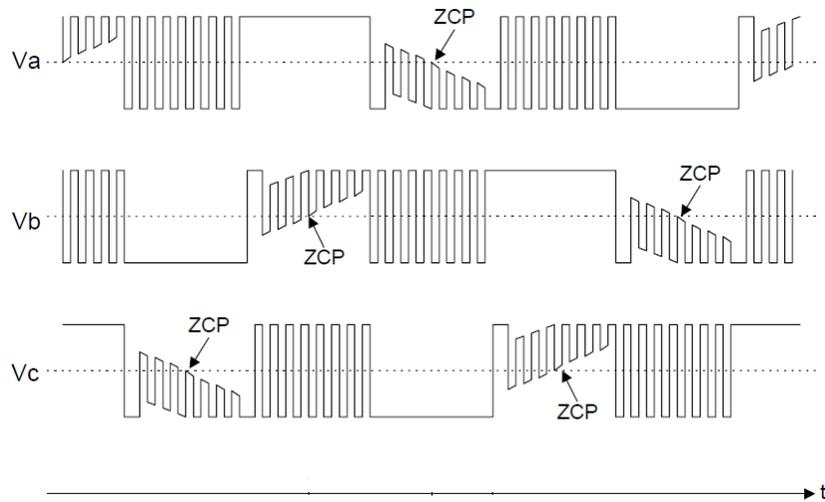
شکل ۳-۱: نحوه قرارگیری حسگرهای اثر هال در استاتور موتور BLDC

(a) نمای سه بعدی موتور (b) برش عرضی موتور

۳-۱-۲: روش های تشخیص موقعیت روتور بدون حسگر

در موتور BLDC، به دلیل شکل موج غیرسینوسی ولتاژ ضد محرکه و جریان فازها امکان به کارگیری مستقیم تبدیل دو محوری و استفاده از تئوری میدان دوار به سختی وجود دارد. بالطبع اغلب روش‌های بدون حسگر که برای موتورهای با تغذیه سینوسی به کار گرفته می‌شدند، برای موتور BLDC کاربردی نخواهند داشت. اغلب تکنیک‌های تخمین وضعیت و سرعت موتور BLDC از اندازه‌گیری و به دست آوردن شکل موج های ولتاژ، جریان، ولتاژ ضد محرکه و یا استفاده از تغییر شار ناشی در استاتور به دست می‌آید [۲۷].

به عنوان نمونه، در برخی روش‌ها ولتاژ یا جریان اعمالی به ترمینال موتور استخراج می‌گردند و با حذف هارمونیک‌های بالا از آن‌ها، لحظه‌ی تغییر فاز محاسبه می‌شود. در شکل ۳-۲ می‌توان این روند را مشاهده نمود.



شکل ۳-۲: ولتاژهای فیلتر شده ترمیتال موتور در روش PWM

و در برخی دیگر از روش‌ها با اندازه‌گیری درصد ولتاژ ضد محرکه، لحظه گذر از صفر^۱ را به دست می‌آورند. در شکل ۳-۳ می‌توان این مورد را نیز رویت نمود.

روش‌های متداول دیگری در این زمینه موجود هستند که اساس تمامی آن‌ها کاهش خطا در تخمین موقعیت و سرعت روتور می‌باشد که به دلیل طولانی شدن بحث، تنها به نام بردن برخی از این روش‌ها بسنده می‌کنیم. روش‌های مختلف تشخیص موقعیت روتور به روش بدون حسگر را می‌توان به ۵ گروه اصلی ذیل تقسیم بندی نمود [۲۶]، [۲۷]، [۲۹]:

(۱) روش‌های بر مبنای ولتاژ Back-EMF

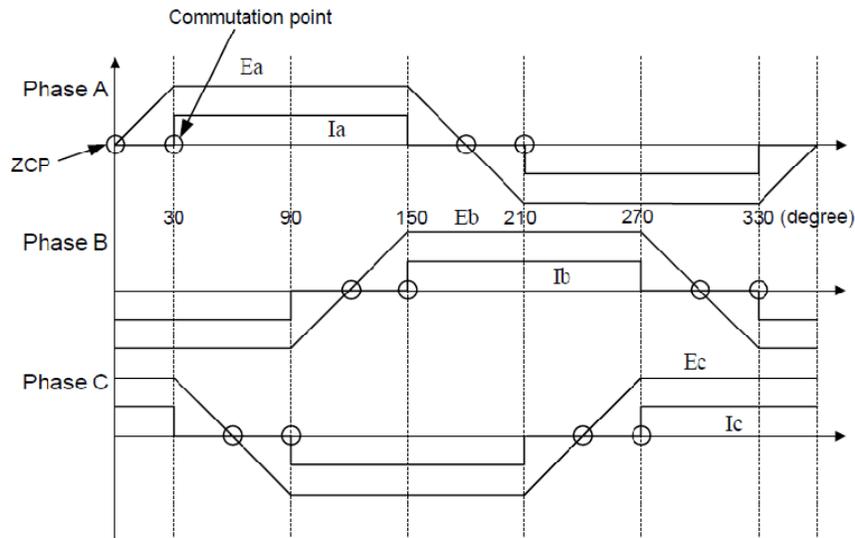
(۲) روش تخمین شار نشتی استاتور

(۳) استفاده از تغییرات اندوکتانس استاتور

(۴) استفاده از توابعی مناسب از ولتاژ ضد محرکه

(۵) روش‌های مبتنی بر تئوریهای کنترلی

^۱zero crossing point(ZCP)



شکل ۳-۳: ولتاژهای ضد محرکه و ارتباط آن‌ها با کموتاسیون فاز

۳-۲- روش‌های کنترلی درایو موتور BLDC

درایوهای الکتریکی با قابلیت عملکرد متفاوت نیاز به کنترل کننده‌هایی دقیق و سریع دارند که با توجه به شرایط و عملکرد موتور، انتظارات را برآورده نمایند. قوت و ضعف خصوصیات کنترل کننده‌ها با توجه به شرایط کارکردی موتور تغییر می‌کند، از جمله مواردی که در کنترل کننده‌ها مد نظر قرار می‌گیرد، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- عملکرد سریع و دقیق
- سادگی در پیاده سازی
- تطبیق پذیری با شرایط بار و ورودی سیستم
- کاهش در هزینه‌ها

رفتار دینامیکی یک موتور BLDC با استفاده از تکنیک‌های کنترلی مناسب می‌تواند به فرم بهینه در آید. تکنیک‌های کنترلی مورد استفاده برای موتور BLDC شامل روش‌های کنترل کلاسیک و روش‌های کنترل هوشمند می‌باشد. در ادامه به شرح مختصری از هر دو دسته می‌پردازیم.

۳-۲-۱- روش‌های کنترل کلاسیک

روش‌های کنترل کلاسیک شامل دو دسته، کنترل کننده‌های خطی و کنترل کننده‌های غیر خطی می باشد. در اغلب کاربردهای صنعتی و به ویژه در موضوع مورد بحث، استفاده از کنترل کننده PID به عنوان کنترل کننده‌ی پایه همواره مطرح بوده است. ضرایب مناسب در این کنترل کننده با استفاده از تکنیک‌های بهینه سازی و یا با استفاده از روش آزمون و خطا به دست می آیند. از معایب روش‌های کلاسیک می توان موارد زیر را نام برد [۳۰]:

- در مواردی با دینامیک بالا که در آن تغییرات بار و ورودی وجود دارد کنترل دقیقی نمی‌توان اعمال نمود
- زمانی که حالات مدل نشده‌ای از پارامترهای موتور وجود دارد نمی‌تواند به عنوان تنظیم کننده‌ی سرعت گشتاور و یا موقعیت انتظارات مورد نظر را برآورده سازد.
- رفتارهای غیر خطی سیستم منجر به اختلال در روند کنترل خواهد شد
- به منظور کنترل مطلوب سیستم، می‌بایست مدل دقیق ریاضی از تمام سیستم به دست آورده شود.

پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌ی تئوری کنترل غیر خطی که قابل کاربرد در درایوهای موتورهای الکتریکی نیز باشد، صورت گرفته است. مهمترین روش‌های کنترل غیر خطی به کار رفته در درایوهای موتورهای BLDC شامل روش‌های خطی سازی با فیدبک، کنترل ساختار متغیر و روش‌های کنترل تطبیقی می باشد.

هر چند که وجود پیچیدگی‌های تئوریک، طراحی پیچیده‌ی این روش‌ها و پیاده سازی نه چندان آسان آن‌ها، عملاً استفاده از این روش‌ها را در کاربردهای صنعتی با محدودیت مواجه نموده است. این امر موجب شده است تا برخی از محققین تمایل به استفاده از روش‌های هوشمند پیدا نمایند، که به توضیح آن می-پردازیم.

۳-۲-۲- روش های کنترل هوشمند

محققین با الگو گیری از شیوهی عملکرد انسان در حل مسائل پیچیده روش‌هایی نوینی به منظور بهبود در عملکرد کنترلی سیستم‌های صنعتی ابداع نمودند. از جمله زمینه‌های پیشرو می‌توان روش شبکه‌های عصبی، روش سیستم فازی و الگوریتم ژنتیک را نام برد.

سیستم های فازی بر اساس نحوه‌ی تصمیم گیری انسان‌ها بنا شده است و یا به عبارتی کیفیت را همراه با کمیت نموده است. به بیان ساده‌تر در این سیستم‌ها، مدلسازی کمیتها به صورت کیفی و شهودی انجام گرفته است. این امر سبب مقابله با موارد نامعین و پیش بینی نشده می‌شود. از مزایای بزرگ سیستم‌های فازی، سادگی و قابلیت فهم آسان آن می‌باشد که استفاده و درک آن را بسیار ساده می‌نماید. صحت این روش در حل سیستم‌های پیچیده‌ی کنترلی، هوش مصنوعی، مدلسازی و تشخیص الگو با استفاده از نمونه‌های متعدد مورد تأیید قرار گرفته است [۳۱]، [۳۲].

در دیدگاه شبکه عصبی، سعی شده از نحوه‌ی عملکرد سیستم اعصاب و مغز انسان الگو برداری شود و با تکیه بر قابلیت پردازش موازی در شبکه های عصبی به حل مسائل پیچیده اقدام نماید.

گزینه‌ی دیگری که محققین در حل مسائل از آن بهره جسته‌اند تلفیق این دو روش یعنی سیستم فازی و شبکه عصبی و به کارگیری توأمان ویژگی‌های هر دو روش و ایجاد سیستم هیبرید فازی - عصبی شده است. که علاوه بر داشتن قابلیت استنتاج فازی، از پردازش موازی و قابلیت یادگیری شبکه های عصبی نیز بهره‌مند است.

کنترل کننده‌های فازی عصبی می‌توانند ساختاری ساده‌تر از سیستم‌های فازی یا شبکه‌های عصبی از حیث داشتن تعداد قوانین فازی، تعداد لایه و تعداد نورونها داشته باشد که موضوع بحث مقالات جدید می‌باشد [۳۰]، [۳۲].

در این پایان نامه به دلیل بهره‌گیری از روش منطق فازی به عنوان کنترل کننده سرعت، به شرح کاملتر این روش می‌پردازیم.

۳-۳- سیستم های فازی

در سال ۱۹۶۵ تئوری منطق فازی توسط پرفسور لطفی زاده معرفی شد. این امر زمینه ساز تحقیقات وسیعی بر روی ویژگی‌ها و کاربردهای این شیوه‌ی جدید شد که موجب به کارگیری در سیستم‌های کنترل فازی به عنوان مهمترین استفاده‌های تئوری منطق فازی شده است.

در واقع سیستم‌های کنترل فازی مجموعه‌ای از قواعد شرطی فازی هستند که توسط کاربر طراحی و اجرا می‌شود. مهمترین اصل در منطق فازی، ساختارهای کنترل کننده‌های فازی است دانش زبانی محققین را به کار می‌گیرد. کیفیت نهایی سیستم طراحی شده، به شدت وابسته به نحوه‌ی طراحی قوانین می‌باشد. که این وابستگی زیاد را می‌توان یکی از مشکلات در طراحی و به کارگیری این روش یاد کرد. البته استراتژی-هایی به منظور حل کاستی‌های احتمالی نظیر روش‌های آزمون و خطا، روش‌های بهینه سازی نظیر الگوریتم ژنتیک بکار گرفته می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در تئوری کنترل منجر به جایگزین شدن تکنیک‌های مبتنی بر هوش های مصنوعی با روش های مرسوم شده است [۳۳]-[۳۵].

البته در برخی راهکارهای نوین در سیستم کنترلی از تلفیق کنترل کننده های کلاسیک و روش های هوشمند نیز بهره جسته اند به عنوان مثال، کنترل سرعت موتور BLDC با استفاده از ترکیب کنترل فازی به دلیل رفتار مناسب در لحظه گذرا به همراه کنترل کننده PI بدلیل عملکرد مناسب در دوره ی پایداری می توان نام برد [۳۶].

از مزایای روش های هوشمند می توان موارد زیر را نام برد:

- در این سیستم‌ها می‌توانند تخمین‌گر مناسبی از ورودی‌های ناشناخته باشد.
- در برابر تغییر پارامترها بسیار مقاوم است.
- طراحی این سیستم‌ها نیازی به مدل ریاضی فرآیند ندارند.
- قابلیت حذف نویز را داراست.

۳-۳-۱- پیکربندی یک سیستم فازی

ساختارهای مختلفی از یک سیستم فازی مطرح شده است از جمله آنها می‌توان سیستم‌های فازی خالص^۱، سیستم‌های فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ^۲ (TSK) (این نوع ساختار با نام سوگنو نیز شناخته می‌شود) و سیستم‌های فازی با فازی ساز و فازی‌زدا را نام برد

در دو سیستم ابتدایی مشکلاتی وجود دارد از جمله این که در سیستم فازی خالص ورودی و خروجی کمیات فازی‌اند و مقادیر حقیقی از سیستم‌های تحت بررسی نیستند، در ساختار دوم هم به دلیل این که پایگاه قواعد فازی فرموله شده ریاضی است، به صورت دانش بشری نمی‌توان بیان نمود، که این موضوع موجب کاهش انعطاف پذیری این نوع ساختار می‌شود. در ساختار سوم که به بررسی آن می‌پردازیم و از این ساختار در نوشتار پیش رو استفاده شده، مشکلات دو روش قبل مرتفع شده است [۳۳].

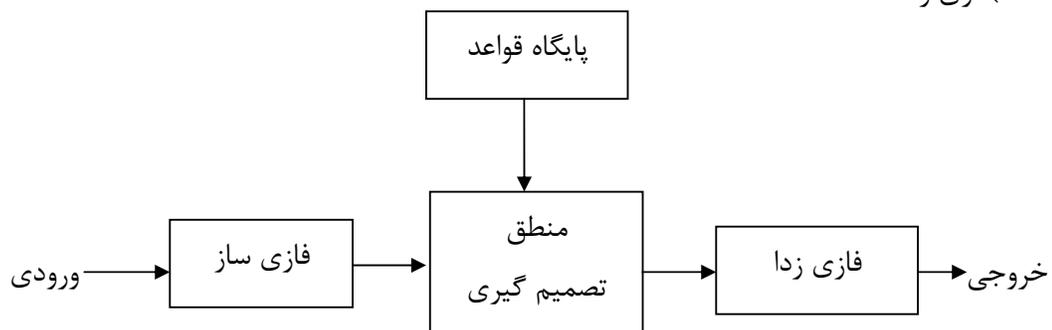
در شکل ۳-۴ ساختار کلی یک سیستم استنتاج فازی قابل مشاهده می‌باشد. این ساختار از ۴ قسمت اصلی تشکیل شده است:

الف) فازی ساز

ب) پایگاه قواعد

ج) منطق تصمیم گیری

د) فازی زدا



شکل ۳-۴: ساختار کلی سیستم استنتاج فازی

^۱ Pure fuzzy system

^۲ Takagi-Sugeno-Kang

الف) فازی ساز^۱

وظیفه این قسمت تبدیل کمیت های حقیقی ورودی به مقادیر فازی تبدیل می نماید. به عبارت ساده تر متغیر های عددی به مقادیر کیفی نظیر کم، بزرگ، منفی و غیره تبدیل می شوند. این عمل به واسطه توابع عضویت صورت می گیرد. نوع تابع عضویت در کیفیت عمل فازی سازی تاثیر مستقیم می گذارد. انتخاب تابع عضویت با توجه به شرایط کاری توسط محقق تعیین می شود.

توابع عضویت مقادیری بین صفر و یک را دارا هستند و درجه تعلق یک کمیت ورودی را به مجموعه فازی مشخص می نماید. اگر تعلق مقدار ورودی به مجموعه فازی به طور مطلق معین باشد، آنگاه درجه تعلق آن کمیت به مجموعه فازی یک می باشد، به عبارتی به طور صد در صد به مجموعه فازی تعلق دارد. و به همین ترتیب در مورد کمیتی که به مجموعه فازی تعلق نداشته باشد، درجه تعلق آن به مجموعه فازی صفر خواهد بود. برای کمیتی با میزان تعلق بین این دو مقدار نیز درجه تعلق بین صفر و یک تغییر خواهد نمود.

توابع عضویت اشکال مختلفی دارا هستند که تعدادی از مهمترین آن ها در زیر آورده شده اند.

(۱) تابع عضویت گوسی^۲

(۲) تابع عضویت ذوزنقه ای^۳

(۳) تابع عضویت مثلثی^۴

(۴) تابع عضویت زنگوله ای^۵

(۵) تابع عضویت سیگموئید^۶

(۶) تابع عضویت Z شکل^۷

^۱fuzzifier

^۲Gaussian curve membership function

^۳Trapezoidal membership function

^۴Triangular membership function

^۵Generalized bell membership function

^۶Sigmoid curve membership function

^۷Z-shaped curve membership function

(۷) تابع عضویت π شکل^۱

(۸) تابع عضویت S شکل^۲

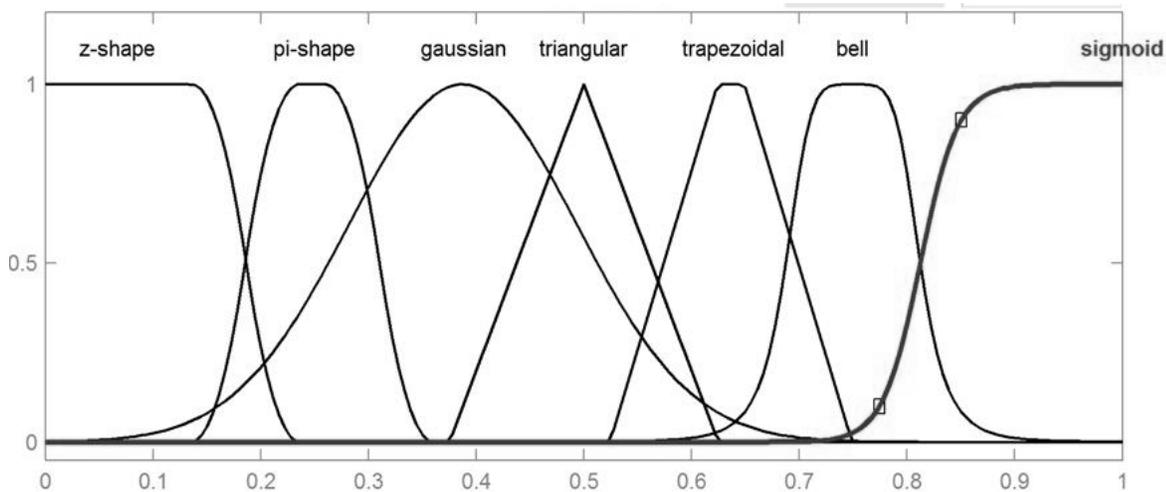
در شکل ۳-۵ این توابع عضویت در محیط MATLAB نشان داده شده اند.

(ب) پایگاه قواعد^۳

قلب سیستم فازی در حقیقت همین بخش می‌باشد و در آن قواعد استنتاجی نگهداری می‌شود که شامل قواعد شرطی فازی به فرم اگر... آن‌گاه... می‌باشد. یک نمونه از این نوع قواعد به فرم زیر می‌باشد:

اگر X_1 برابر با A و X_2 برابر با B باشد، آن‌گاه Y برابر با C خواهد بود.

فرم فوق از نوع قواعد ممدانی^۴ بوده که در آن X_1, X_2 ورودی‌ها، Y خروجی، A، B، C هم مجموعه‌های فازی هستند. در این پایان نامه، از همین فرم ممدانی استفاده شده است.



شکل ۳-۵: توابع عضویت در MATLAB / SIMULINK

(ج) منطق تصمیم‌گیری (سیستم استنتاج)^۱

^۱ PI-shaped curve membership function

^۲ S-shaped curve membership function

^۳ Rule base

^۴ Mamdani

چگونگی استخراج خروجی‌ها از روی ورودی‌ها و قواعد در این قسمت مشخص می‌شود. در کاربردهای مختلف که از منطق فازی استفاده می‌شود از روش‌های استنتاج متفاوتی استفاده می‌شود. پردازش نهایی بر روی یک کمیت فازی انجام می‌شود که این کمیت حاصل از استنتاج فازی است.

د) فازی زدا^۲

دقیقاً عکس عملی که در فازی ساز انجام می‌شود در فازی زدا صورت می‌گیرد. به دلیل این که کمیت خارج شده از استنتاج یک کمیت فازی است، نمی‌توان آن را به سیستم تحت کنترل اعمال نمود. بدین منظور آن را به کمیت حقیقی تبدیل می‌نمایند. این کار با استراتژی‌های مختلفی نظیر روش مرکز جاذبه، مرکز سطح و روش ارتفاع صورت می‌گیرد.

۳-۴ روش‌های کنترل موتور BLDC

این موتورها به دلیل داشتن عملکرد مناسب و راندمان بالا، گران هستند و طبعاً روش‌های کنترل سرعت آن‌ها نیز نباید عملکرد و راندمان کلی درایو را آن‌چنان پایین بیاورد. لذا بر خلاف موتورهای القایی که از روش‌های کنترلی کم بازدهی استفاده می‌شد (روش تغییر مقاومت روتور، کاهش ولتاژ)، در این گونه موتورها از روش‌های پربازده که همگی بر مبنای تغییر فرکانس - ولتاژ هستند، استفاده می‌شود.

روش‌های کنترل موتور BLDC به دو دسته کلی تقسیم می‌شود:

(۱) کنترل اسکالر^۳

(۲) کنترل برداری^۴

۳-۴-۱ کنترل اسکالر

این روش کنترلی بر اساس روابط حالت ماندگار موتور معتبر است؛ در این روش دامنه و فرکانس متغیرهای کنترلی (جریان، ولتاژ و ...) مورد کنترل قرار می‌گیرند. از جمله موارد استفاده این روش می‌توان

^۱ Inference system

^۲ Defuzzifier

^۳ Scaler control

^۴ Vector control

به زمانی اشاره کرد که چندین موتور به صورت موازی و توسط یک مبدل قدرت تغذیه شود. روش کنترل ولت-هرتز (v/f ثابت) از ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های کنترل موتور در این دسته می‌باشد. این روش، بدون فیدبک می‌باشد و از شرایط حاکم در حالت ماندگار به مانند عدم وجود تغییرات شار استفاده می‌نماید.

۳-۴-۲ کنترل برداری

روش کنترل اسکالر دارای مشکلاتی است و در ناپایداری سیستم تاثیر می‌گذارد؛ و در نهایت پاسخ سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در روش کنترل برداری، بردار متغیر کنترلی مد نظر می‌باشد. این روش برای تمامی حالات موتور حتی در حالت گذرا نیز معتبر است. در این روش دامنه و فاز شار و گشتاور به طور هم‌زمان کنترل و پاسخ سیستم با کاهش اثر تزویج شار بهبود می‌یابد. از روش‌های کنترل برداری مهم می‌توان به روش کنترل شارگرا^۱، روش کنترل مستقیم گشتاور^۲ و روش کنترل سرعت اشاره کرد.

کنترل شارگرا (foc)

روش کنترل شارگرا، که روش رایج‌تری می‌باشد نزدیک به ربع قرن پیش در آلمان توسط Hesse، Leonard و Black ابداع شد. در این روش روابط میان پارامترهای موتور به دستگاه مرجع گردان روتور منتقل می‌شود. این انتقال موجب می‌شود متغیرها در حالت ماندگار، به فرم DC درآیند و تعداد معادلات کاهش یافته که این امر باعث ساده سازی روابط می‌شود. و از طرفی ارتباط خطی میان گشتاور با متغیرهای کنترلی را ایجاد می‌نماید. در این روش شار موتور AC به گونه‌ای کنترل می‌شود که شار استاتور و روتور همواره بر یکدیگر عمود باشند. و موجب کنترل گشتاور موتور AC به مانند موتور DC تحریک مستقل شود [۳۲]، [۳۸].

در روش کنترل برداری، جهت کنترل جریان‌های i_{ds} و i_{qs} ، چون این جریان‌ها در دستگاه دوار روتور تنظیم می‌شوند، باید مقادیر جریان‌های i_{cs} و i_{bs} و i_{as} ، اندازه‌گیری شده توسط تبدیل‌های مناسب به

^۱ Field oriented control

^۲ Direct torque control

مقادیرشان در دستگاه $d-q$ دوار تبدیل شوند. برای انجام تبدیلات ذکر شده باید موقعیت روتور مشخص باشد. در روش‌های با حسگر، از حسگر موقعیت یا سرعت متصل به شفت روتور استفاده می‌شود. اما در صورت عدم استفاده از حسگر سرعت، باید موقعیت روتور به روش‌های مناسبی تخمین زده شود. البته در این روش گشتاور موتور تنها توسط مولفه‌ی q جریان استاتور قابل تنظیم می‌باشد. در دهه‌های گذشته این روش بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته و در سطح وسیعی به کار گرفته شده است این به کارگیری هم-چنان در حال گسترش می باشد [۳۸],[۴۰].

کنترل مستقیم گشتاور (DTC)

کمتر از ۲۰ سال پیش در ژاپن روش کنترلی برای موتورهای AC ارائه شد که مزایای قابل ملاحظه-ای نسبت به روش FOC را برخوردار بود. این روش با نام کنترل مستقیم گشتاور شناخته شده است [۳۸]. اساس این روش بر پایه روش کنترل بنگ بنگ^۱ بود که کنترل بنگ بنگ هم به خوبی در ارتباط با مبدل-های الکترونیک قدرت عمل می‌کرد. در این روش با انتخاب مناسب و استفاده از ۶ یا ۸ بردار فضایی ولتاژ، گشتاور الکترومغناطیسی و شار پیوندی به صورت مستقیم و مستقل از یکدیگر کنترل می‌شود. در این روش روابط میان پارامترهای موتور به دستگاه $d-q$ ثابت استاتور منتقل می شود؛ این انتقال این مزیت را داراست که دیگر نیازی به آگاهی از زاویه روتور نیست. عدم نیاز به آگاهی از موقعیت روتور در کنترل موتور باعث کاهش در حجم محاسبات در مقایسه با روش FOC می‌شود. این روش نسبت به روش کنترل برداری، پاسخ گشتاور سریع‌تری دارد.

با استفاده از مقادیر ولتاژ و جریان، شار و گشتاور موتور تخمین زده می‌شود؛ سپس این مقادیر تخمینی با مقادیر مرجع گشتاور و شار مقایسه می‌شود و خطای گشتاور و سرعت به دست آمده در کنترل کننده‌های هیستریزس مقایسه، و بر اساس خروجی این مقایسه کننده‌ها، بردارهای ولتاژ مناسب انتخاب می‌شود و به سیستم اعمال می‌شود.

^۱ Bang-Bang control method

اگر چه روش کنترل مستقیم گشتاور در ابتدا برای کنترل درایو موتورهای القایی معرفی شد ولی به مرور برای دیگر ماشین‌های AC به مانند ماشین‌های سنکرون رلوکتانسی و ماشین‌های سوئیچ رلوکتانسی نیز به کار گرفته شد. استفاده از این روش در کنترل درایو موتورهای با مغناطیس دائم (PMSM)، در اواخر دهه ۹۰ میلادی صورت پذیرفت [۳۸]-[۴۱].

از معایب روش DTC می‌توان موارد زیر را نام برد:

- فرکانس کلید زنی با بار، سرعت روتور و پهنای باند کنترل کننده‌های هیستریزس تغییر می‌کند.
- ریپل زیاد گشتاور و شار پیوندی در حالت ماندگار.
- در تخمین شار پیوندی استاتور مقاومت استاتور دخیل است. بنابراین هر تغییری در مقاومت استاتور به خطا در شار پیوندی منجر می‌شود.

روش کنترل سرعت

در مورد ماشین‌های مورد بحثمان همان گونه که توضیح داده شد، توزیع مکانی سیم پیچ‌های هر فاز در استاتور به صورت متمرکز می‌باشد. این آرایش در سیم پیچ‌های استاتور، ولتاژ ضد محرکه الکتریکی، دوزنقه-ای در سیم پیچ‌های استاتور توسط روتور مغناطیس دائم ایجاد می‌نماید. ولتاژ ضد محرکه دوزنقه‌ای موجب می‌شود که اندوکتانس متقابل میان روتور و استاتور غیر سینوسی شود. از این رو انتقال روابط به دستگاه‌های دو محوری شناخته شده مثل دستگاه مرجع ساکن، دستگاه مرجع روتور یا دستگاه مرجع سنکرون نتیجه‌ای را حاصل نمی‌کند و در تسهیل روابط کمکی نمی‌نماید. در موتورهای مغناطیس دائم با bEMF سینوسی (PMSM) اندوکتانس‌های متغیر به شکل سینوسی در دستگاه abc، پس از انتقال به دستگاه مرجع d-q به فرم مقادیر ثابت تبدیل می‌شوند [۵]، [۷]. که این به معنای تسهیل در روابط و کنترل آسان‌تر موتور می‌باشد.

البته در موتورهای BLDC می‌توان با یافتن سری فوریه برای ولتاژ ضد محرکه دوزنقه‌ای انتقال به دستگاه مرجع $d-q$ را انجام داد؛ ولی این انتقال شامل ترم‌های زیادی خواهد بود که پیچیدگی و طاقت فرسا بودن این انتقال سبب می‌شود مدل متغیر در دستگاه abc مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]. در این پایان نامه نیز از همین روند پیروی شده است. به عبارتی معادلات و روابط حاکم بر متغیرهای موتور BLDC در دستگاه abc مدل شده و کنترل کننده‌های جریان هیستریزیس در هر فاز به صورت جداگانه شکل دهی به جریان اعمالی به موتور را برعهده گرفته‌اند. در کنار حلقه‌ی کنترل جریان، با استفاده از نمونه‌برداری سرعت موتور و مقایسه با سرعت مرجع، حلقه‌ی کنترل سرعت موتور نیز شکل می‌گیرد. در فصل چهارم، اصول این روش به صورت کامل شرح داده خواهد شد.

۳-۵- روش‌های کنترلی اینورترهای منبع ولتاژی

در سیستم درایو موتورهای BLDC اینورترها به عنوان منبع تحریک موتور عمل می‌نمایند. این مبدل‌های قدرت نقش کلیدی در عملکرد پیوسته و مطابق با انتظارات را بر عهده دارند. اینورترهای قدرت خود نیز به دو دسته‌ی اینورترهای منبع جریان^۱ و اینورترهای منبع ولتاژ^۲ تقسیم می‌شوند؛ اینورترهای منبع ولتاژ به دلیل کوچک بودن امپدانس داخلی، دارای ولتاژ تقریباً ثابتی بوده و برای کاربردهای کنترل سرعت تک موتور و چند موتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی در برابر اتصال کوتاه، ضربه پذیرند و حفاظت باید توسط فیوزهای تند کار انجام شود [۴۲].

از مهمترین روش‌های کنترلی که در اینورترهای منبع ولتاژی^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد روش PWM^۴ است که چندین روش در زیر مجموعه آن قرار می‌گیرد پرکاربردترین این روش‌ها عبارتند از:

(۱) روش SPWM^۵

(۲) روش PWM با نمونه برداری یکنواخت

^۱ Current source inverter(CSI)

^۲ Voltage source inverter(VSI)

^۳ Voltage source inverter(vsi)

^۴ Pulse wide modulation

^۵ Sinusoidal pulse wide modulation

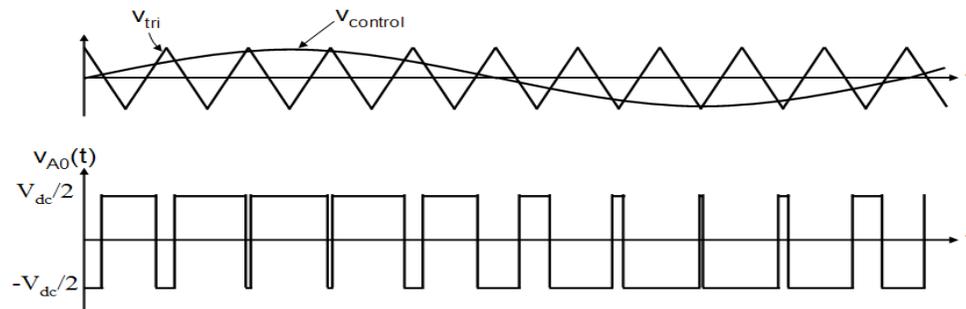
۳) روش PWM با حذف ویا کاهش هارمونیک های انتخابی

۴) روش SVPWM^۱

۵) روش مدولاسیون hysteresis

۳-۵-۱ روش SPWM

SPWM مبتنی بر موج حامل رایج‌ترین و پر استفاده‌ترین روش‌های PWM است که این به دلیل پیاده‌سازی و اجرای راحت در هر دو دستیابی آنالوگ و دیجیتال است. قوانین و مراحل روش PWM برای یک VSI سه فاز، قابل توسعه برای کنترل VSI، n فاز نیز می‌باشد. در این روش سیگنال PWM از مقایسه یک سیگنال مدولاسیون سینوسی با یک موج حامل که می‌تواند موج مثلثی دولبه یا یک موج دندان اره‌ای تک لبه باشد، ساخته می‌شود. فرکانس موج حامل معمولاً در مقایسه با سیگنال مدولاسیون خیلی بالاتر در نظر گرفته می‌شود. قاعده‌ی اجرای یک مدولاتور PWM با موج حامل در شکل ۳-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۶: قاعده ی روش PWM مبتنی بر موج حامل مثلثی

انتخاب روش مناسب PWM امری بسیار مهم، به منظور کنترل تغذیه‌ی درایوهای سرعت متغیر چند فاز است.

از آنجایی که خروجی VSI مورد نظر به طراحی سیم پیچی استاتور ماشین چند فاز بستگی دارد، مشخصات مدولاتور PWM به خصوصیات سیم پیچی استاتور وابسته است. اگر یک ماشین چند فاز با سیم پیچ توزیع سینوسی طراحی شده باشد، روش PWM می‌بایست ولتاژ خروجی سینوسی تولید نماید، آن

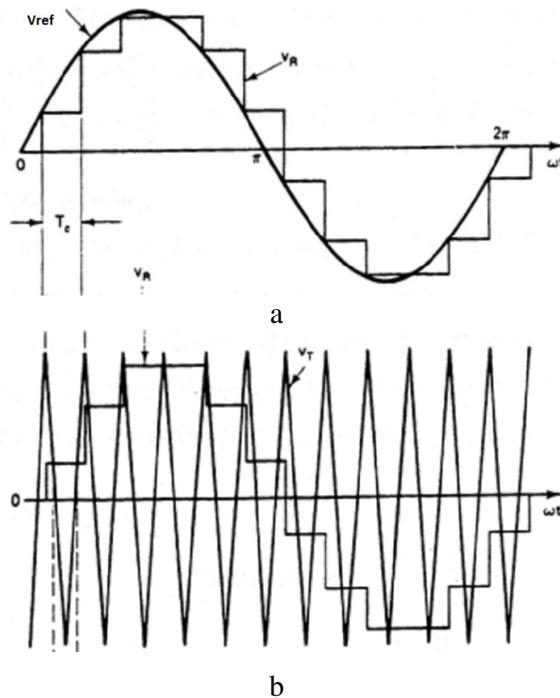
^۱ Space vector pulse wide modulation

هم بدون وجود هیچ مؤلفه‌ی هارمونیک مرتبه‌ی پایین، چون وجود این هارمونیک‌ها منجر به ایجاد هارمونیک‌های جریان بزرگی در استاتور می‌شود. این‌ها از محدودیت‌های ایجاد شده توسط امپدانس نشتی استاتور است. و این در حالی است که در ماشین‌های چند فاز با سیم پیچی متمرکز، تزریق مقدار مشخصی هارمونیک‌های ولتاژ از مرتبه‌ی پایین توصیه می‌شود تا افزایش گشتاور تولیدی را منجر شود [۴۳].

در سیستم‌های n فاز، سیگنال‌های مدولاسیون با استفاده از n سیگنال سینوسی که در فاصله‌ی $2\pi/n$ نسبت به هم قرار گرفته‌اند با یک سیگنال حامل فرکانس بالا (دندان اره‌ای یا مثلثی شکل) مقایسه می‌شود شکل می‌گیرد و n تابع سوئیچینگ برای n فاز اینورتر به دست می‌آید [۴۳].

۳-۵-۲ روش PWM با نمونه برداری یکنواخت

در این روش ولتاژهای نمونه برداری شده V_R ، از ولتاژهای مرجع به صورت پله‌ای انتخاب شده و با موج حامل مثلثی مقایسه شده و سیگنال مدولاسیون ساخته می‌شود در شکل ۳-۷ این روند قابل مشاهده است.



شکل ۳-۷: روند شکل‌گیری موج مدولاسیون به روش نمونه برداری یکنواخت

در مقایسه با روش SPWM این روش مدولاسیون، هارمونیک‌های پایین کوچک‌تری دارد [۴۲].

۳-۵-۳ روش PWM با حذف هارمونیک‌های انتخابی

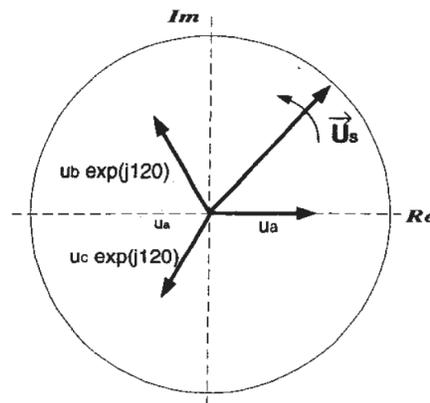
در این روش، کنترل مولفه‌ی اصلی ولتاژ با حذف همزمان هارمونیک‌های دلخواه انجام می‌پذیرد. در این روش با حذف هارمونیک‌های پایین، دامنه هارمونیک‌های بالاتر افزایش می‌یابد [۴۲].

از معایب روش PWM می‌توان موارد زیر را نام برد ۱: -افزایش تلفات در فرکانس‌های بالای سوئیچینگ

۲- کاهش سطح ولتاژ

۳-۵-۴ روش SVPWM :

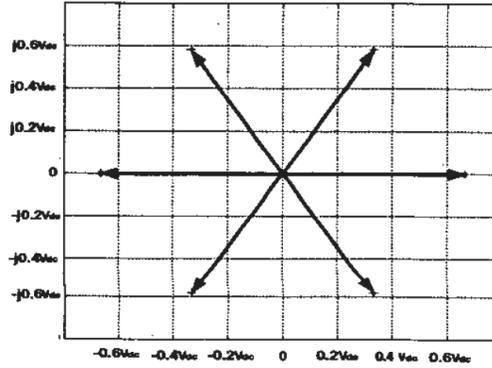
SVPWM یک روش PWM است که از بردارهای فضایی استفاده می‌کند تا زمان پالس‌های اعمالی به اینورتر را تولید کند. روش SVPWM میزان کمتری اعوجاج هارمونیک در ولتاژ و یا جریان خروجی در مقایسه با SPWM ایجاد می‌نماید شکل ۳-۸ جهت بردارهای فضایی را برای هر فاز، و بردار فضایی ولتاژ منتجه را برای سیستم سه فاز نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۸: بردار فضایی یک سیستم سه فاز

برای ولتاژ سینوسی سه فاز متقارن، بردار فضایی \vec{U}_s یک مسیر دایروی پیوسته را جاروب می‌کند که با فرکانس ولتاژ ترمینال می‌چرخد؛ در یک اینورتر سه فاز تأمین کننده ولتاژ موتور، تنها شش ناحیه‌ی کاری وجود دارد و بردار فضای ولتاژ می‌تواند در یکی از نواحی جای گیرد. این تعداد در اینورتر سه فاز از رابطه‌ی

۳ فضای ممکن برای بردارهای فضایی نتیجه می‌شود. که شش بردار فضایی غیر صفر (فعال) و دو بردار صفر (غیر فعال)، یک شش وجهی را مطابق شکل زیر ایجاد می‌نماید.



شکل ۳-۹: بردارهای فضایی سه فاز

این ۶ بردار از رابطه‌ی تبدیل سه فاز به دوفاز که با نام تبدیل پارک شناخته می‌شود، مطابق با رابطه ۱-۳ به دست می‌آیند [۴۴].

(۱-۳)

V_{cn}, V_{bn}, V_{an} مقادیر ولتاژ فاز در فضای abc اند.

حال در بحث بردارهای فضایی اینورترهای چند فاز به منظور درک مناسبتری از این روش در این نوع اینورترها اشاره‌ای به روش SVPWM، در یک اینورتر ۹ فاز می‌شود. روش‌های مدولاسیون در سیستم‌های متقارن و بسط آن به سیستم‌های چند فاز، منجر به ارائه‌ی فضای n بعدی با چندین صفحه $d-q$ ، دو بعدی شده است. این قضیه آنالیز سیستم‌های چند فاز را آسان‌تر می‌نماید.

ماتریس تبدیل در حالت ۹ فاز در زیر آورده شده است.

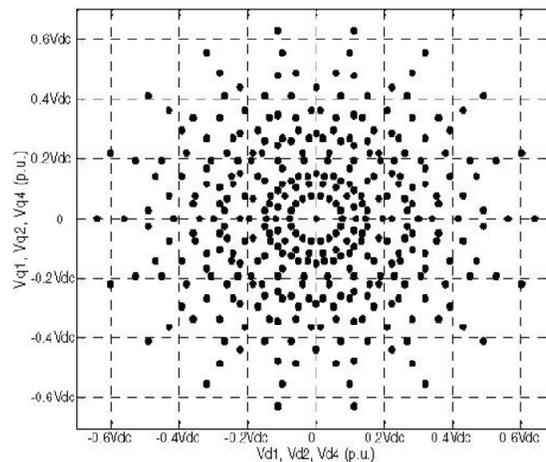
$$C = \frac{2}{9} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(5\alpha) & \cos(6\alpha) & \cos(7\alpha) & \cos(8\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(4\alpha) & \sin(5\alpha) & \sin(6\alpha) & \sin(7\alpha) & \sin(8\alpha) \\ 1 & \cos(2\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(6\alpha) & \cos(8\alpha) & \cos(\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(5\alpha) & \cos(7\alpha) \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & \sin(6\alpha) & \sin(8\alpha) & \sin(\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(5\alpha) & \sin(7\alpha) \\ 1 & \cos(3\alpha) & \cos(6\alpha) & 1 & \cos(3\alpha) & \cos(6\alpha) & 1 & \cos(3\alpha) & \cos(6\alpha) \\ 0 & \sin(3\alpha) & \sin(6\alpha) & 0 & \sin(3\alpha) & \sin(6\alpha) & 0 & \sin(3\alpha) & \sin(6\alpha) \\ 1 & \cos(4\alpha) & \cos(8\alpha) & \cos(3\alpha) & \cos(7\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(6\alpha) & \cos(\alpha) & \cos(5\alpha) \\ 0 & \sin(4\alpha) & \sin(8\alpha) & \sin(3\alpha) & \sin(7\alpha) & \sin(2\alpha) & \sin(6\alpha) & \sin(\alpha) & \sin(5\alpha) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

که در آن $\alpha = 2\lambda/9$ است. با به کارگیری این تبدیل برای همه ی ۵۱۲ حالت ترکیب ولتاژ فاز. بردار فضایی که یک سیستم نه فاز را در ۴ صفحه ی ۲ بعدی نمایش می دهد می تواند از رابطه ی ۲-۳ به دست آید [۴۵].

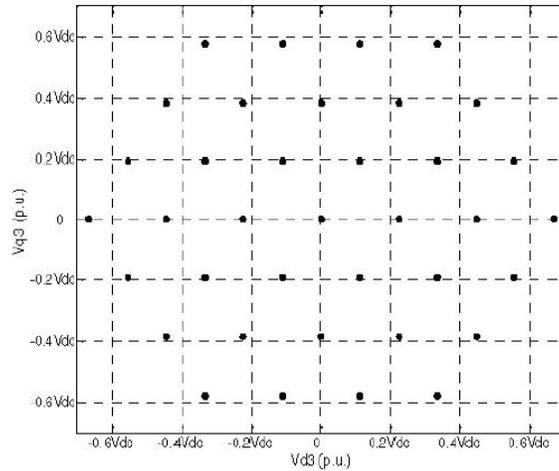
$$[V_{d1} \ V_{q1} \ V_{dr} \ V_{qr} \ V_{q3} \ V_{dr} \ V_{d4} \ V_{q4} \ V_{zs}]^T = C \cdot [V_a \ V_b \ V_c \ V_d \ V_e \ V_f \ V_g \ V_h \ V_i]^T \quad (2-3)$$

V_{zs} زیر فضای مرتبه ی صفر تک بعدی است.

وضعیت بردارهای فضایی در صفحات جدید که با نام $d_4, q_4, d_3, q_3, d_2, q_2, d_1, q_1$ نامیده شده است. در شکل ۳-۱۰ و ۳-۱۱ دیده می شود.

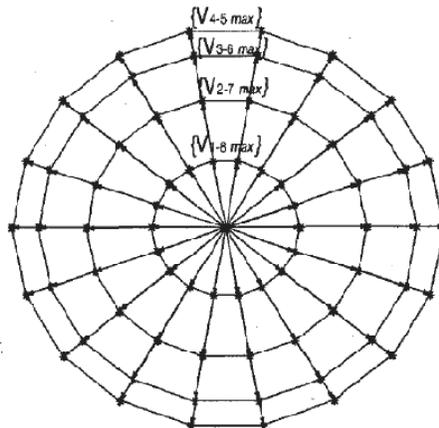


شکل ۳-۱۰: بردارهای فضایی در صفحات $d_1, q_1, d_2, q_2, d_4, q_4$ [۴۵]



شکل ۳-۱۱: بردارهای فضایی در صفحه d_3-q_3 [۴۵]

در این دو شکل نقطه نشانگر جای بردارهای فضایی است. در شکل ۳-۱۰ مقدار زیادی حشو وجود دارد. ولی در صفحه d_3-q_3 قابل توجه است، که همهی ۵۱۲ بردار فضایی در ۳۷ نقطه یا به عبارتی ۳۷ بردار فضایی اصلی قرار داده شده است. این ۵۱۲ بردار فضایی منتجه می‌تواند به چهار مجموعه‌ی [۲-۷]، [۳-۶]، [۴-۵] و [۱-۸] تقسیم شوند که این ترکیبات بر اساس تعداد سوئیچ روشن و خاموش در هر بازه‌ی سوئیچینگ است. به عنوان مثال ترکیب [۴-۵] بدان معنی است که در تمام حالات ممکن سوئیچینگ دو وضعیت برای اینورتر داریم الف) ۴ سوئیچ روشن و ۵ سوئیچ خاموش ب) ۴ سوئیچ خاموش و ۵ سوئیچ روشن. بردارهای فضایی مرتبط با مجموعه‌های حداکثری چهار ۱۸ ضلعی را شکل می‌دهد که در شکل ۳-۱۲ آورده شده است.



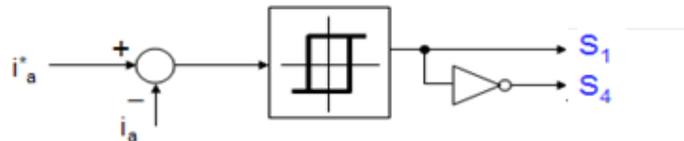
شکل ۳-۱۲: بردارهای فضایی منتخب [۴۴]

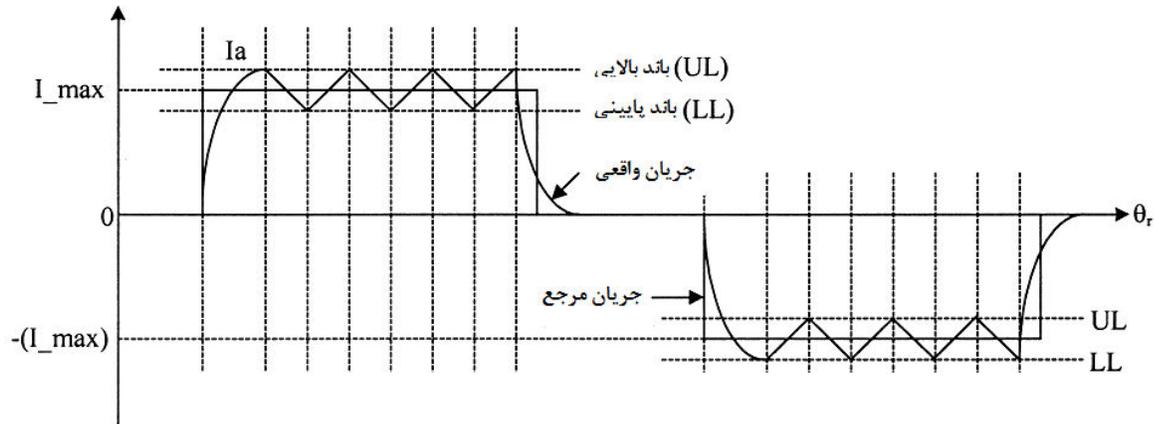
این چند وجهی تمام زیر مجموعه‌های این چهار مجموعه‌ی سوئیچینگ را شامل می‌شود. به صورت خلاصه می‌توان بیان کرد در روش SVPWM در اینورترهای چند فاز که در بالا بدان اشاره شد بردارهای فضایی شاخص مطابق با اتفاقی که در شکل ۳-۱۱ و ۳-۱۲ افتاده است، انتخاب می‌شوند و سپس با توجه به محل قرار گیری بردار ولتاژ در یکی از این فضاها، پالس‌های سوئیچینگ اینورتر ساخته می‌شود [۴۴].

۳-۵-۵ روش کنترل جریان HYSTERESIS

اینورترهای منبع ولتاژ، PWM کنترل شده با جریان که با کنترل جریان هیستریزس نیز شناخته می‌شود در صنعت کاربرد زیادی دارد. در این روش با استفاده از مقایسه موج مرجع جریان با موج جریان حامل در یک باند مشخص، پالس‌های سوئیچینگ حاصل می‌شود و این پالس‌ها به سوئیچ‌ها اعمال می‌شود. در این روش کوچک انتخاب کردن مقدار پهنای باند هیستریزس موجب نزدیک‌تر شدن شکل موج مدولاسون به شکل موج مرجع می‌شود و بزرگ انتخاب نمودن پهنای باند موجب کاهش تلفات سوئیچینگ می‌شود [۴۶].

در روش کنترل سرعت موتور به کارگرفته شده در این پایان نامه، جریان موتور BLDC به روش کنترل جریان هیستریزس به موتور اعمال می‌شود. در شکل ۳-۱۳ شمای کلی از این روش را برای یک ساق از اینورتر منبع ولتاژی می‌بینیم [۴۶].





شکل ۳-۱۳: روش هیستریزیس برای یک فاز موتور

از مشخصات این روش می‌توان موارد زیر را نام برد

مزایا :

- پاسخ دینامیکی مناسب
- کم هزینه
- پیاده سازی آسان

معایب :

- متغییر بودن فرکانس سوئیچینگ
- افزایش تلفات سوئیچینگ

۳-۶-راه اندازی موتور BLDC

در موتورهای مغناطیس دائم، اعم از BLDC و PMSM ، راه اندازی موتور زمانی که مکان روتور مشخص نیست ممکن است پیامدهای غیر منتظره‌ای را در پی داشته باشد، از آن جمله می‌توان گردش موتور در خلاف جهت مورد نظر را نام برد. در اغلب کاربردهایی که از این نوع موتورها استفاده می‌شود، حادث شدن این پدیده به دلیل وظیفه‌ای که این موتور برعهده دارد قابل پذیرفتن نیست. به منظور مرتفع

ساختن این مشکل می‌بایست از روش‌های راه اندازی مناسبی استفاده نمود که در راه اندازی موتور از مکان اولیه نامعلوم خطایی در راه اندازی موتور ایجاد ننماید.

روش های راه اندازی موتورهای BLDC را می توان در سه دسته کلی جای داد [۴۷]، [۴۸].

(۱) راه اندازی حلقه باز

(۲) تخمین مکان اولیه روتور با تکنیک های مناسب

(۳) راه اندازی با ایجاد نقطه ای مشخص برای روتور

۳-۶-۱ راه اندازی حلقه باز

از این روش معمولاً زمانی استفاده می‌شود که کنترل موتور بواسطه روش های بدون حسگر که بر مبنای اندازه گیری ولتاژ ضدمحرکه موتور انجام می پذیرد انجام می‌شود. عملکرد در مود حلقه باز تا زمانی که موتور به یک سرعت حداقل برسد که بتوان ولتاژ ضد محرکه را اندازه گیری نمود ادامه می‌یابد. تحریک اعمال شده به موتور می‌باید به میزانی باشد تا گشتاور الکترو مغناطیسی ایجاد شده حاصل از این تحریک از گشتاور های مقاوم در موتور بیشتر باشد [۴۹].

۳-۶-۲ تخمین مکان اولیه روتور با تکنیک های مناسب

در این روش با تخمین اولیه مکان روتور، موتور را به صورت صحیح راه اندازی می نمایند. پیاده سازی این روش به صورت‌های مختلفی قابل انجام می‌باشد. در موتورهای مغناطیس دائم با قطب برجسته، با اندازه گیری تغییرات اندوکتانس استاتور می‌توان مکان روتور را به‌دست آورد کاربرد این روش در سرعت صفر تا سرعت‌های متوسط است. روش شناخته شده دیگر، استفاده از اثر مگنت روتور بر اشباع مسیر شار استاتور در تعیین مکان اولیه روتور است [۵۱]-[۵۳].

۳-۶-۳ راه اندازی با ایجاد نقطه ای مشخص برای روتور

استفاده از این روش در راه اندازی موتور BLDC از رایج‌ترین روش‌هاست. در این روش با تحریک سیم پیچ‌های استاتور موتور BLDC، روتور را به نقطه‌ای مشخص هدایت و در آن نقطه نگه می‌دارند. چنان‌چه در این روش جریان نیز به‌صورت حلقه بسته کنترل شود، دقت این روش افزایش خواهد یافت [۲۸].

فصل چهارم :

درایو موتور BLDC، دوازده فاز و کنترل آن

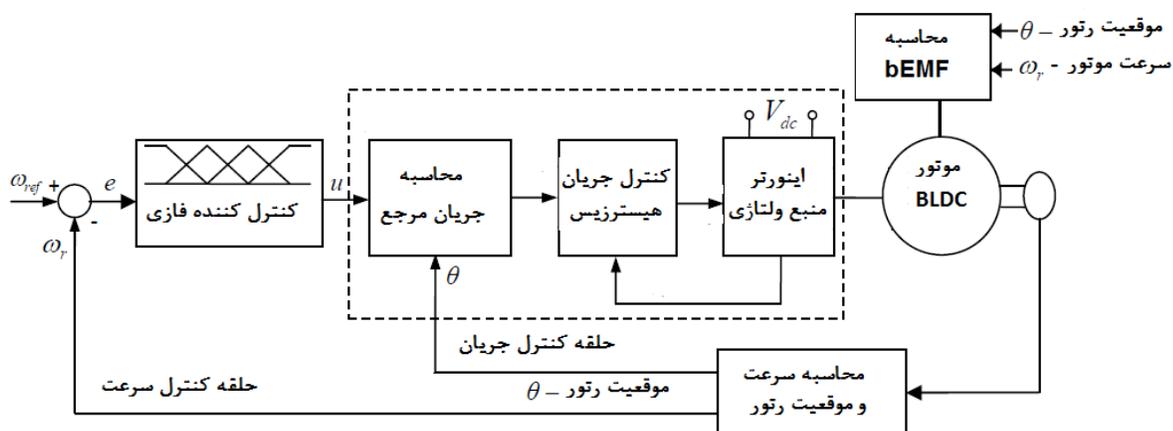
روش‌های کنترل موتورهای مغناطیس دائم در فصل قبل از نظر گذشت؛ دریافتیم روش‌های متداول و نوین در بهره‌برداری بهینه از موتورهای سه‌فاز را طی نموده و با نقش و اصول به‌کارگیری آن‌ها نیز آشنا شدیم. هدف اصلی در این فصل و در این پایان‌نامه کنترل سرعت یک موتور BLDC دوازده فاز تغذیه شده با یک اینورتر منبع ولتاژی کنترل شده با جریان می‌باشد.

در این پایان‌نامه، کنترل جریان موتور BLDC به منظور دستیابی به کنترل سرعت، در دستگاه abc، به عبارتی بدون انتقال روابط و پارامترهای موتور به دستگاه‌های مرجع شناخته شده، انجام پذیرفته است. معادلات و متغیرهای موتور پس از استخراج از روابط تئوری حاکم بر موتور، در فضای abc پیاده‌سازی شده است. کنترل سرعت این موتور BLDC که توسط اینورتر منبع ولتاژی کنترل شده با جریان، تغذیه می‌شود به کمک کنترل کننده‌ی فازی انجام پذیرفته است. روش کنترل سرعت به‌کارگرفته شده در این پایان‌نامه با در نظر گرفتن جمع جریان‌های فاز برابر با صفر معتبر می‌باشد.

در این فصل ابتدا مدل معادل با موتور BLDC دوازده فاز، به عنوان قلب درایو BLDC، ارائه خواهد گردید سپس در ادامه به بررسی قسمت‌های دیگر روش به‌کارگرفته شده در کنترل سرعت درایو BLDC دوازده فاز می‌پردازیم. لازم به ذکر است شبیه‌سازی‌ها با کمک نرم‌افزار MATLAB/simulink نسخه R2008a انجام پذیرفته است.

۴-۱ پیاده‌سازی روش کنترل سرعت درایو موتور BLDC دوازده فاز

بلوک دیاگرام روش استفاده شده در کنترل درایو موتور BLDC به صورت شماتیک در شکل ۴-۱ آورده شده است. این روش شامل بلوک‌های مختلفی می‌باشد؛ که در ادامه‌ی این فصل، شرح وظیفه و نحوه‌ی پیاده‌سازی هر قسمت به تفصیل توضیح داده خواهد شد.



شکل ۴-۱ بلوک دیاگرام روش کنترل سرعت درایو BLDC

مدلسازی سیستم درایو، با فرضیاتی انجام پذیرفته که به قرار زیر می باشد:

- (۱) موتور در حالت اشباع قرار ندارد.
- (۲) bEMF به فرم دوزنقه ای می باشد.
- (۳) موتور با آرایش ستاره، وبدون اتصال زمین می باشد
- (۴) جمع جریان های فاز برابر با صفر است.
- (۵) مقاومت در سیم پیچی های استاتور در تمام فازها برابر و اندوکتانس خودی و متقابل مقادیر ثابتی اند.
- (۶) سوئیچ های قدرت در اینورتر همگی از نوع IGBT وایده آل می باشد.

۴-۲ بلوک موتور

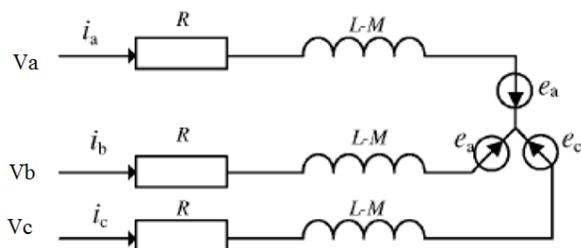
در فصل دوم مدل ریاضی معادل با موتور BLDC سه فاز ارائه شد، حال در این فصل با استفاده از آن نتایج که مجدد در رابطه ی ۴-۱ الی ۴-۳ آورده شده است، مدل معادل با موتور BLDC دوازده فاز بکار گرفته شده در این پایان نامه را پیاده سازی می نماییم.

$$(۴-۱)$$

$$T_e = T_l + j \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \quad (۴-۲)$$

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{1}{\omega_r} [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c] \quad (3-4)$$

مدل معادل موتور BLDC سه فاز با اتصال ستاره، در سیم پیچ‌های استاتور، به صورت شماتیک استخراج شده است و در شکل ۴-۲ آورده شده است.



شکل ۴-۲: مدار معادل با موتور BLDC سه فاز

به مانند روندی که در موتور BLDC سه فاز پیش بردیم، معادلات موتور دوازده فاز را نیز به صورت زیر استخراج می‌نماییم.

معادلات حاکم را به فرم ماتریسی به صورت زیر خواهیم داشت:

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + [e] \quad (4-4)$$

که در آن

ولتاژهای فاز:

$$[V] = [V_a \ V_b \ V_c \ V_d \ V_e \ V_f \ V_g \ V_h \ V_i \ V_j \ V_k \ V_l]^T \quad (V)$$

مقاومت معادل در هر فاز :

$$[R] = \text{diag}[R]_{12 \times 12} = R \times I_{12}$$

$$R = R_a = R_b = R_c = R_d = R_e = R_f = R_g = R_h = R_i = R_j = R_k = R_l \quad (\Omega)$$

ماتریس I_{12} یک ماتریس همانی 12×12 می باشد

جریان های فاز :

$$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \ i_d \ i_e \ i_f \ i_g \ i_h \ i_i \ i_j \ i_k \ i_l]^T \quad (A)$$

ولتاژ های ضد محرکه الکتریکی :

$$[e] = [e_a \ e_b \ e_c \ e_d \ e_e \ e_f \ e_g \ e_h \ e_i \ e_j \ e_k \ e_l]^T \quad (v)$$

اندوکتانس های خودی و متقابل :

$$[L]_{12 \times 12} = \begin{bmatrix} L & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ M & L & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ M & M & L & M & M & M & M & M & M & M & M & M \\ M & M & M & L & M & M & M & M & M & M & M & M \\ M & M & M & M & L & M & M & M & M & M & M & M \\ M & M & M & M & M & L & M & M & M & M & M & M \\ M & M & M & M & M & M & L & M & M & M & M & M \\ M & M & M & M & M & M & M & L & M & M & M & M \\ M & M & M & M & M & M & M & M & L & M & M & M \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & L & M & M \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & L & M \\ M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & M & L \end{bmatrix} \quad (H)$$

$$L=L_a=L_b=L_c=L_d=L_e=L_f=L_g=L_h=L_i=L_j=L_k=L_l \quad (H)$$

اندوکتانس های متقابل یکسان فرض و با نماد M نمایش داده شده است.

برای جریان های فاز در موتور BLDC دوازده فاز داریم :

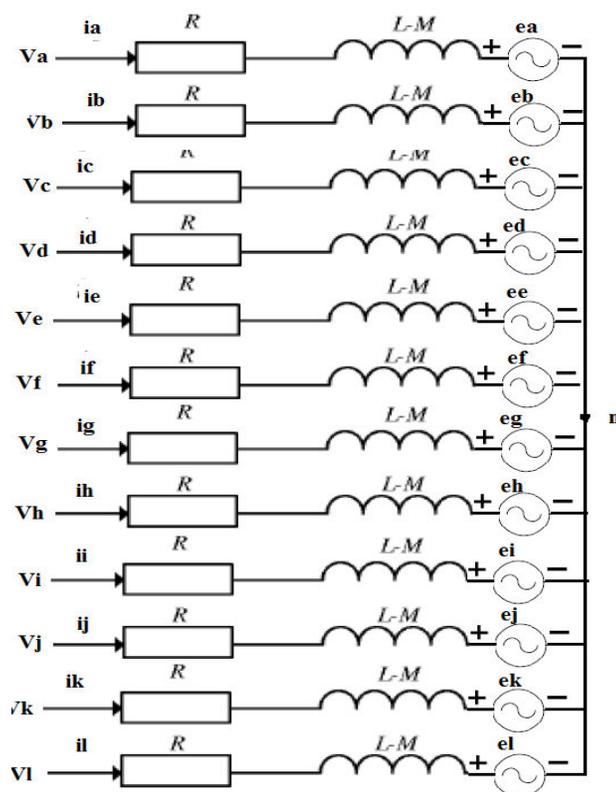
$$i_a + i_b + i_c + i_d + i_e + i_f + i_g + i_h + i_i + i_j + i_k + i_l = 0 \quad (5-4)$$

همانند موتور در حالت سه فاز که در فصل دوم روابط آن استخراج شد در موتور BLDC دوازده فاز نیز

ماتریس معادل با اندوکتانس های خودی و متقابل با استفاده از رابطه ۴-۵ به فرم زیر نتیجه می شود.

$$[L]_{12 \times 12} = \begin{bmatrix} L - M & \cdot \\ \cdot & L - M & \cdot \\ \cdot & \cdot & L - M & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & L - M & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & L - M & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & L - M & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & L - M & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & L - M & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & L - M & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & L - M & \cdot & \cdot \\ \cdot & L - M & \cdot \\ \cdot & L - M \end{bmatrix}$$

در شکل ۳-۴ مدار معادل با موتور با روابط بالا ارائه شده است.



شکل ۴-۳: مدار معادل موتور BLDC دوازده فاز

روابط دینامیکی حاکم بر موتور دوازده فاز را نیز به شکل زیر مورد استفاده قرار داده ایم.

$$T_e = T_l + j \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \quad (۴-۶)$$

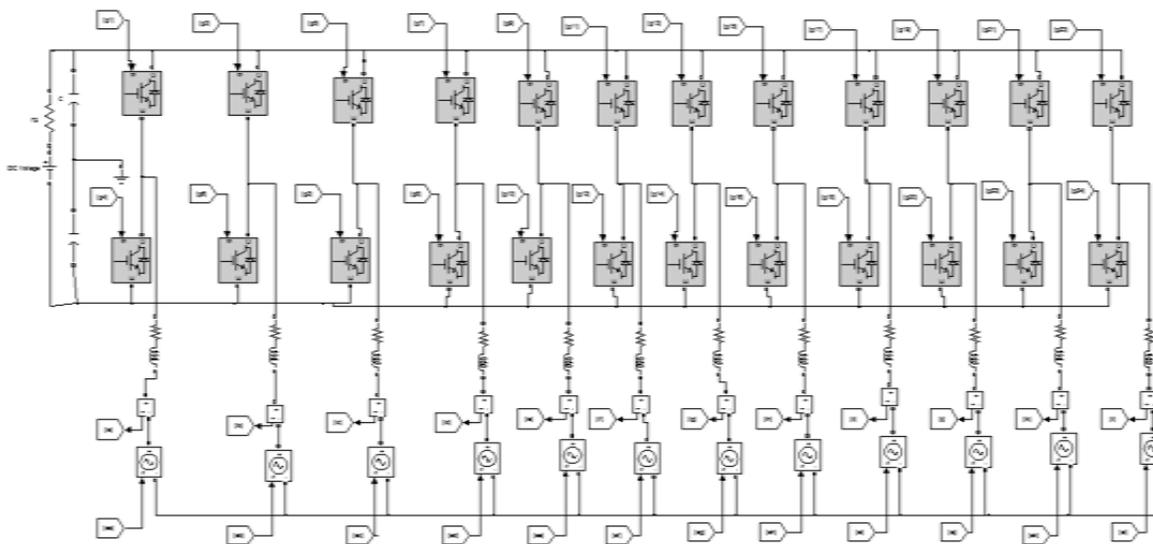
و برای گشتاور الکترومغناطیسی به فرم زیر عمل نموده ایم:

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f + e_g i_g + e_h i_h + e_i i_i + e_j i_j + e_k i_k + e_l i_l] \quad (۴-۷)$$

در شکل ۴-۴ درایو موتور BLDC دوازده فاز مدل شده در محیط شبیه سازی آورده شده است.

ورودی‌های بلوک موتور مقادیر ولتاژی هستند که توسط اینورتر شکل گرفته و اعمال می‌شود، خروجی نیز سرعت (ω_r) و وضعیت روتور (θ_r) می‌باشد.

در موتور BLDC همان طور که قبلا گفته شده تغذیه فازهای موتور به واسطه‌ی یک مبدل قدرت صورت می‌گیرد. این مبدل قدرت یک اینورتر منبع ولتاژی است، که در بازه‌های زمانی مشخصی ولتاژ DC را بر فازهای استاتور اعمال می‌نماید. در ادامه توضیح خواهیم داد که این بازه‌های زمانی چگونه به دست می‌آید .



شکل ۴-۴: مدل موتور دوازده فاز در محیط شبیه سازی

۴-۳ مدهای عملکرد

موتور BLDC دوازده فاز ، مدل شده در این پایان نامه در ۲۴ مود عملکردی در هر دوره، پیاده سازی شده است. این ۲۴ مود از نحوه تحریک سیم پیچ های استاتور به وجود می آید. این حالات تحریک سیم پیچ ها می بایست به گونه ای انجام بپذیرد که قطب‌های مغناطیس دائم روتور، قطب‌های حاصل از تحریک استاتور را دنبال نماید. این حالات عملکردی در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱: مودهای عملکرد برای جریان فازهای موتور

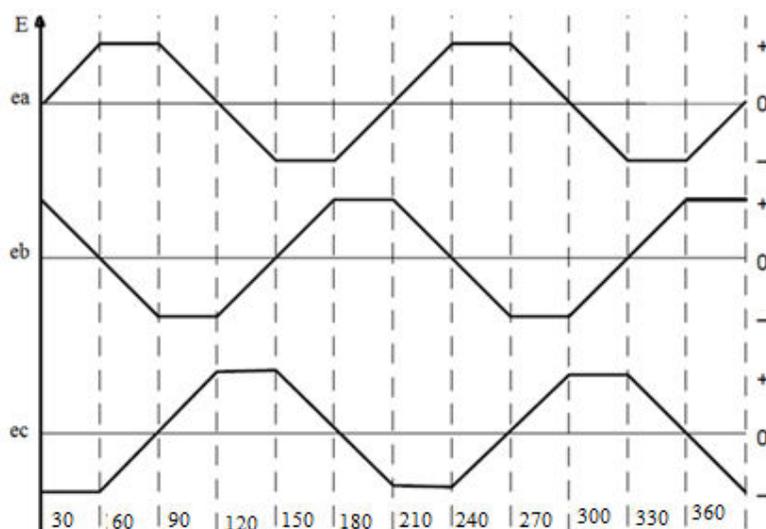
مود عملکرد	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
۱	۰	-	-	-	-	-	۰	+	+	+	+	+
۲	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
۳	+	۰	-	-	-	-	-	۰	+	+	+	+
۴	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
۵	+	+	۰	-	-	-	-	-	۰	+	+	+
۶	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+
۷	+	+	+	۰	-	-	-	-	-	۰	+	+
۸	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+
۹	+	+	+	+	۰	-	-	-	-	-	۰	+
۱۰	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+
۱۱	+	+	+	+	+	۰	-	-	-	-	-	۰
۱۲	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
۱۳	۰	+	+	+	+	+	۰	-	-	-	-	-
۱۴	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
۱۵	-	۰	+	+	+	+	+	۰	-	-	-	-
۱۶	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
۱۷	-	-	۰	+	+	+	+	+	۰	-	-	-
۱۸	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-
۱۹	-	-	-	۰	+	+	+	+	+	۰	-	-
۲۰	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
۲۱	-	-	-	-	۰	+	+	+	+	+	۰	-
۲۲	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-
۲۳	-	-	-	-	-	۰	+	+	+	+	+	۰
۲۴	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+

این ترتیب اعمال جریان به فازهای استاتور در بلوک جریان مرجع و به کمک Embedded MATLAB

Function انجام پذیرفته است.

۴-۴ بلوک ولتاژ ضد محرکه (bEMF):

در موتور ارائه شده در این پایان نامه همان طور که قبلا بیان شد ولتاژ ضد محرکه از نوع ذوزنقه‌ای می‌باشد. ولتاژ ضد محرکه تابعی از وضعیت روتور (θ_r) می‌باشد به عبارتی، این که روتور در چه وضعیتی قرار دارد تعیین می‌کند که در کدام فاز از سیم پیچ‌های استاتور ولتاژ ضد محرکه القا شده و به چه میزان می‌باشد. در شکل ۴-۵ ارتباط میان وضعیت روتور و ولتاژ القا شده درسه فاز از دوازده فاز استاتور را می‌توان دید.

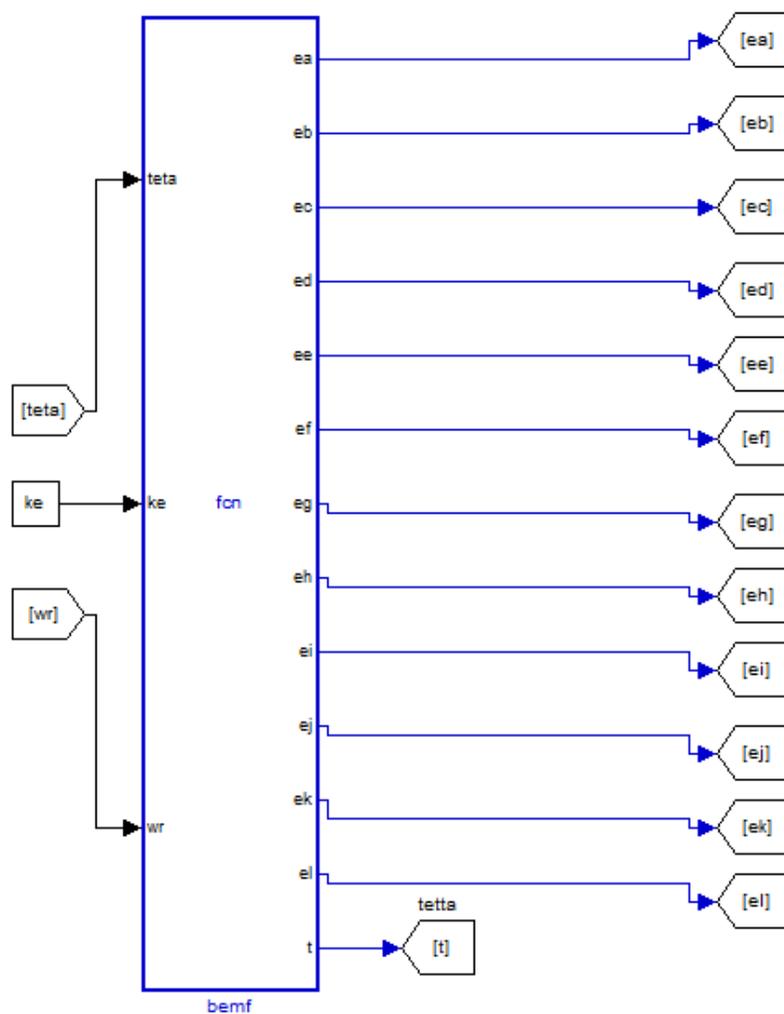


شکل ۴-۵ ولتاژهای bEMF در موتور دوازده فاز

bEMF با سرعت موتور و شار تولید شده توسط روتور مغناطیس دائم رابطه مستقیم دارد. از آن جا که شار تولیدی توسط روتور مغناطیس دائم ثابت می‌باشد، لذا نیروی ضد محرکه موتوری با سرعت موتور رابطه‌ی مستقیم دارد؛ در نتیجه اندازه نیروی ضد محرکه موتوری (E) برابر با $K_e \cdot \omega_r$ می‌باشد. (K_e ثابت ولتاژ ضد محرکه و ω_r سرعت زاویه ای موتور می‌باشد)، این شکل موج ذوزنقه‌ای به کمک m-file برای دوازده فاز موتور شکل گرفته و به عنوان ولتاژ ضد محرکه، به واسطه `Matlab Function Embedded` مطابق با رابطه‌ی ۴-۴ و بمانند شکل ۴-۶ به موتور اعمال می‌شود. مقدار زاویه روتور باید که بین 0 تا 2π رادیان در هر سیکل الکتریکی محدود شود. این تبدیل در وضعیت روتور توسط تابع `fix` در `mfile` مطابق با رابطه‌ی ۴-۸ استخراج شده است.

$$t = (\text{teta} - (\text{fix}(\text{teta}/(\gamma * \text{pi}))) * \gamma * \text{pi});$$

(۸-۴)



شکل ۴-۶: بلوک تولید کننده ولتاژهای ضد محرکه فازها بر حسب وضعیت روتور

نحوه‌ی ساخته شدن bEMF در شبیه سازی برای بازه ی $0 - \pi/2\epsilon$ در عبارت ۴-۹ آورده شده است.

$$\text{if}(t \geq 0) \&\& (t < \pi/2\epsilon)$$

(۹-۴)

```

ea=(2*epsilon*e/pi)*t;
eb=-e;
ec=-e;
ed=-e;
ee=-e;
ef=-e;
eg=-(2*epsilon*e/pi)*t;
eh=e;
    
```

```
ei=e;
ej=e;
ek=e;
el=e;
```

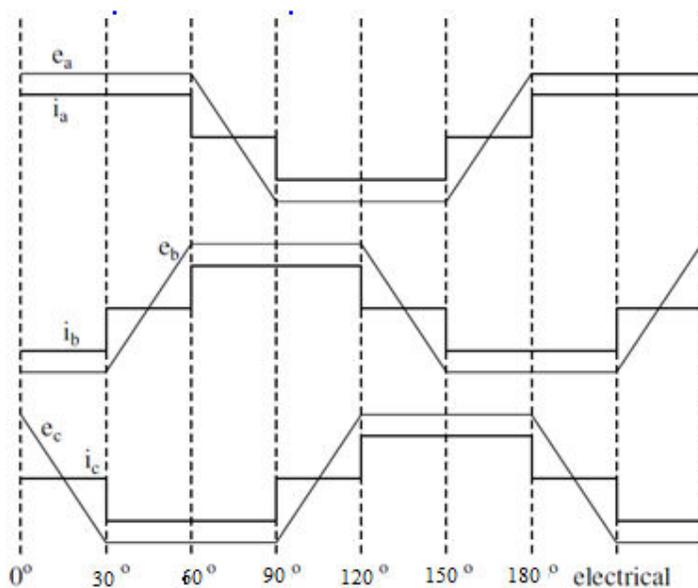
۴-۵ بلوک جریان مرجع

همان طور که قبلاً هم بیان شد، در موتورهای BLDC ولتاژ القا شده بر روی سیم پیچ‌های استاتور که توسط روتور مغناطیس دائم تولید می‌شوند، ذوذنقه‌ای شکل می‌باشند. بنابراین برای تولید گشتاور الکترومغناطیسی ثابت، شکل موج جریان می‌باید به صورت شبه مربعی و سنکرون با ولتاژ bEMF باشد. لازم به ذکر است دامنه‌ی جریان مرجع توسط کنترل کننده فازی تعیین می‌گردد. این مقدار در رابطه ی ۴-۱۰ با i_s نامگذاری شده است. در شکل ۴-۷ ارتباط میان شکل موج جریان و ولتاژ bEMF برای سه فاز از دوازده فاز آورده شده است. همان طور که از شکل ۴-۷ مشهود است، از وضعیت روتور در ساخت جریان شبه مربعی فازهای استاتور و سنکرون با bEMF استفاده شده است. بدین منظور از یک بلوک Embedded Matlab Function استفاده نموده و طبق رابطه ی ۴-۱۰ این کار پیاده سازی شده است (برای بازه ی $0-\pi/24$).

```
t=(teta-(fix(teta/(۲*pi)))*۲*pi); (۴-۱۰)
```

```
if(t>=۰)&&(t<pi/۲۴)
```

```
    iaref=۰;
    ibref=-is;
    icref=-is;
    idref=-is;
    ieref=-is;
    ifref=-is;
    igref=۰;
    ihref=is;
    iiref=is;
    ijref=is;
    ikref=is;
    ilref=is;
```



شکل ۴-۷: ارتباط میان جریان موتور و ولتاژ bEMF

همان گونه که از شکل ۴-۷ مشخص است جریان موتور و ولتاژ bEMF در هر فاز به صورت کاملاً سنکرون با یکدیگرند که این امر اساس ایجاد گشتاور الکترو مغناطیسی ثابت با نوسان پایین البته با صرف نظر کردن از نوسان گشتاور ناشی از کموتاسیون می باشد که این منجر به بهره گیری از ظرفیت حداکثری گشتاور موتور، می شود.

۴-۶ بلوک سرعت و وضعیت موتور

به منظور کنترل سرعت در سیستم ارائه شده، ابتدا می بایست سرعت واقعی موتور به همراه وضعیت روتور استخراج شود. بدین منظور رابطه دینامیکی موتور (۴-۶) را دوباره به فرم زیر باز نویسی می نمایم.

$$\omega_r = \frac{1}{J} \int (T_e - T_l - B\omega_r) dt \quad (4-11)$$

رابطه بین توان الکتریکی (P_e) و توان مکانیکی (P_m) نیز به صورت ذیل بیان می شود:

$$P_e = E \cdot I_{max} \quad (4-12)$$

$$P_e = P_m = T_e \cdot \omega_r \quad (4-13)$$

همچنین گشتاور به طور مستقیم با تغییر دامنه جریان مرجع مطابق با رابطه زیر مرتبط است.

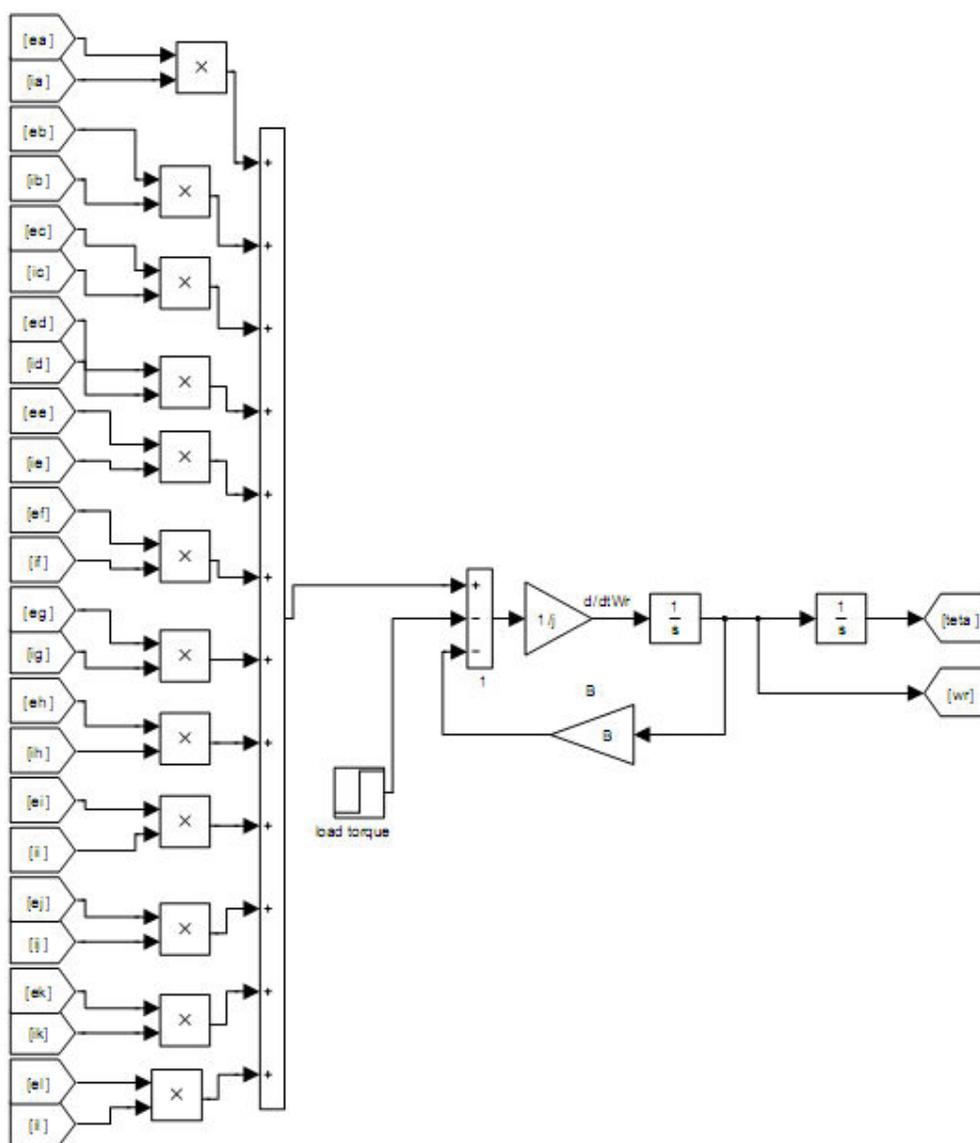
$$T_e = \frac{E}{\omega_r} I_{\max} = K_t \cdot I_{\max} \quad (14-4)$$

$$K_t = \frac{E}{\omega_r} = \frac{K_e \cdot \omega_r}{\omega_r} \approx K_e \quad (15-4)$$

K_t ، ثابت گشتاور است.

با استفاده از روابطی ۱۱-۴ می‌توان سرعت موتور (ω_r) و وضعیت روتور (θ_r) را همان طور که در شکل

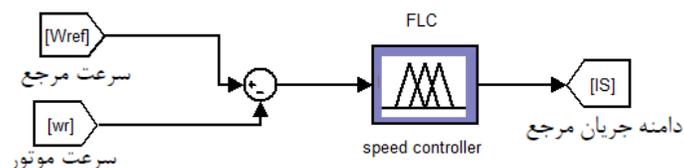
۸-۴ آورده شده استخراج نمود



شکل ۸-۴: روند دستیابی به سرعت (ω_r) و وضعیت موتور (θ_r)

۷-۴ بلوک کنترل سرعت

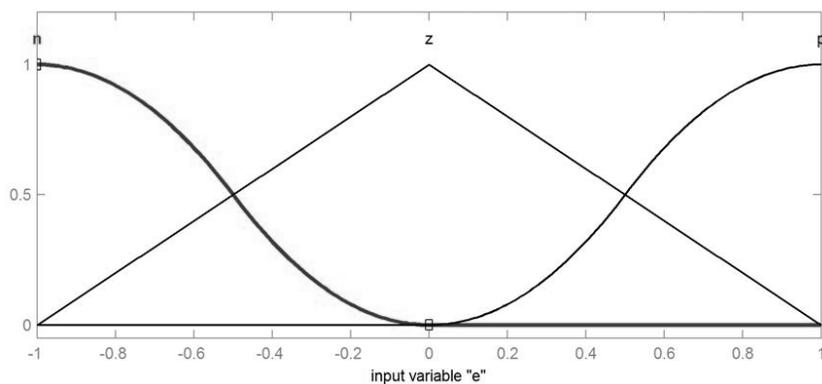
پس از پیاده‌سازی مدل موتور، سرعت و وضعیت موتور را همانگونه که در بخش قبل اشاره نمودیم، استخراج و در کنترل سرعت موتور به مانند شکل ۹-۴ استفاده می‌کنیم.



شکل ۹-۴: محاسبه دامنه جریان مرجع

روند شکل‌گیری کنترل سرعت موتور در شکل ۹-۴ آورده شده است. در این روش خطای سرعت از اختلاف میان سرعت مرجع و سرعت واقعی موتور استخراج شده و به کنترل‌کننده اعمال می‌شود. همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، روش‌های مختلفی در کنترل سیستم‌ها به کار گرفته می‌شود. روش‌های کنترل کلاسیک علی‌رغم مزایایی که طی مدت‌ها ارائه دادند، ولی به مرور با تبلور روش‌های کنترل هوشمند به حاشیه رانده شده و یا به صورت ترکیبی با روش‌های نوین به کار گرفته می‌شوند. در روش کنترل سرعت ارائه شده در این پایان‌نامه به منظور بهره‌گیری از مزایای روش‌های کنترل هوشمند از روش منطق فازی به عنوان کنترل‌کننده سرعت استفاده نموده‌ایم. این کنترل‌کننده سرعت از نوع تناسبی-انتهالی است.

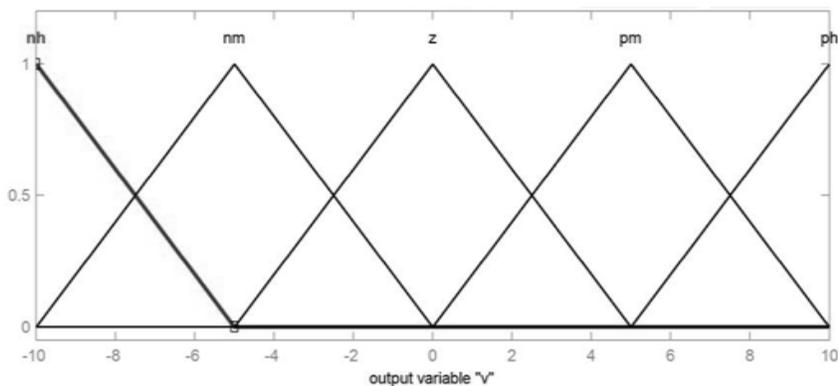
توابع عضویت سیگنال خطای سرعت (e) و تغییرات خطا، به عنوان ورودی‌های کنترل‌کننده فازی در شکل ۱۰-۴ آورده شده است. نوع و بازه‌ی این توابع عضویت به گونه‌ای انتخاب شده تا کنترل‌کننده عملکرد مطلوب‌تری داشته باشد.



شکل ۴-۱۰: توابع عضویت خطای سرعت و تغییرات خطای سرعت کنترل کننده فازی

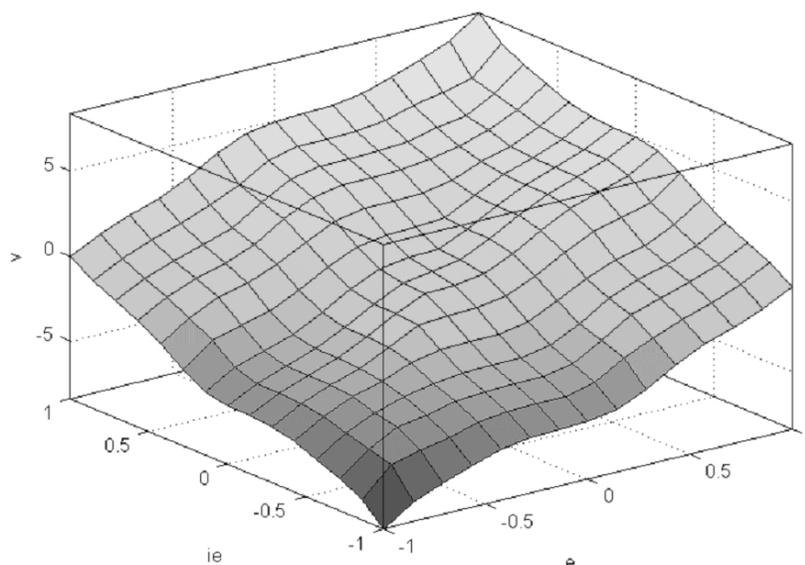
خروجی این کنترل فازی، سطح جریان متناسب با سرعت مورد نظر می باشد. در شکل ۴-۱۱ توابع عضویت خروجی کنترل کننده فازی آورده شده است.

منحنی سه بعدی سطح^۱، کنترل کننده به عنوان نگاشتی از سیگنال خطا و تغییرات خطا بر روی دامنه جریان فاز به عنوان معیاری بر صحت عملکرد ساختار کنترل کننده مطرح می باشد. در شکل ۴-۱۲ منحنی سطح این کنترل کننده آورده شده است. همگونی میان متغیرها و سطح صاف این منحنی نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب این کنترل کننده است.



شکل ۴-۱۱: توابع عضویت خروجی کنترل کننده فازی

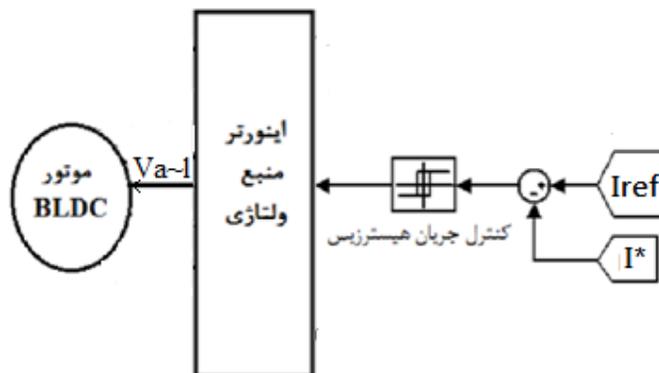
^۱ Surface curve



شکل ۴-۱۲: منحنی سه بعدی سطح، کنترل کننده فازی

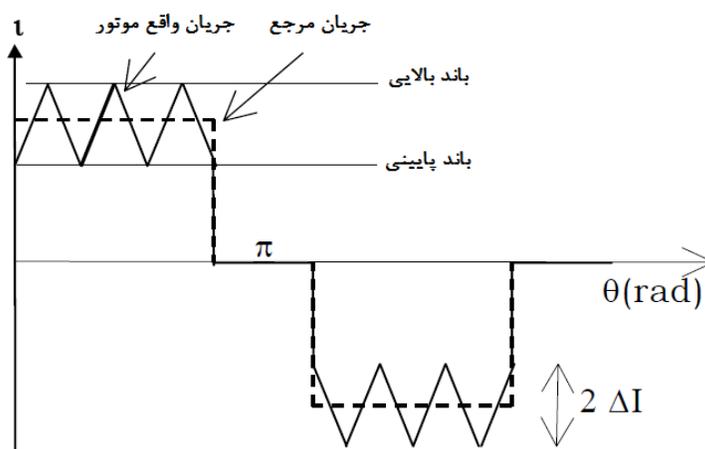
۴-۸ بلوک کنترل جریان هیستریزس

در درایو موتور BLDC تکنیک‌های مدولاسیون PWM ولتاژ و کنترل جریان هیستریزس از اهم روش - های کنترل جریان موتور محسوب می شوند. در این جا از روش کنترل جریان هیستریزس استفاده شده است. این روش روی فازهای موتور به صورت جداگانه پیاده سازی می شود. در این روش اختلاف میان جریان مرجع و جریان واقعی موتور استخراج شده و سپس این مقدار به عنوان سیگنال خطا با محدوده‌ی باند هیستریزس ثابت مقایسه شده، و فرامین سوئیچینگ ساخته می شود. نقش مدولاسیون جریان هیستریزس در ایجاد پالس‌های آتش اینورتر قدرت و کنترل موتور در شبیه سازی در شکل ۴-۱۳ آورده شده است.



شکل ۴-۱۳: مدولاسیون هیستریزس در کنترل سرعت موتور BLDC

در مقایسه‌ی سیگنال خطای جریان با باند هیستریزس چنانچه سیگنال خطا از محدوده‌ی بالایی باند فراتر رود بلافاصله سوئیچ بالایی در فاز مربوطه از اینورتر خاموش خواهد شد و این منجر به کاهش جریان خطا در کنار کاهش سرعت می‌شود. حال اگر سیگنال خطا در آستانه گذر از محدوده‌ی پایینی باند باشد، سوئیچ بالایی در فاز مربوطه از اینورتر روشن خواهد گردید؛ این روند برای یک فاز در شکل ۴-۱۴ آورده شده است.



شکل ۴-۱۴: روش مدولاسیون جریان هیستریزس

حلقه‌ی کنترل سرعت را برای موتور BLDC، دوازده فاز مرور نمودیم، مشخص شد، که قسمت‌های مختلف چه نقشی در کنترل سرعت موتور ایفا می‌نمایند و چگونه در شبیه‌سازی پیاده‌سازی شده‌اند. در فصل بعد نتایج شبیه‌سازی را با استفاده از روش بالا ارائه خواهیم داد.

فصل پنجم:

نتایج شبیه سازی

در فصول قبل ابتدا با ساختار کلی موتور BLDC و ویژگی‌های آن آشنا شدیم در ادامه روش‌های کنترل این نوع موتور از نظر گذشت و در نهایت در فصل قبل روش به‌کارگرفته شده در این گزارش به منظور کنترل سرعت این موتور مطرح شد و راهکار پیاده‌سازی آن به همراه توضیح کامل قسمت‌های مختلف شبیه سازی این روش ارائه شد. در این فصل نتایج حاصل از شبیه سازی، کنترل سرعت برای یک موتور BLDC مطابق با آنچه در فصل قبل مرور شد آورده شده است.

هدف اصلی این گزارش کنترل سرعت یک موتور BLDC، دوازده فاز و مقایسه عملکرد این موتور با موتور مشابه سه فاز می‌باشد. به منظور مقایسه صحیح در این شبیه سازی، توان هر دو موتور در یک مقدار مشخص، انتخاب شده است؛ از دیگر ملاحظات لحاظ شده می‌توان به راه‌اندازی از یک موقعیت مشخص و یکسان، در هر دو موتور را نام برد. بر هر دو موتور در زمان 0.6 S پله‌ی بار اعمال می‌شود، در ضمن زمان نمونه برداری در محیط شبیه سازی به صورت یکسان انتخاب شده است. موتور در هر دو حالت به گونه‌ای در حلقه ی کنترل سرعت راه اندازی می‌شود که در سرعت 80 rad/s حتی پس از اعمال پله‌ی بار ادامه‌ی کار دهد. مشخصات موتور BLDC دوازده فاز و موتور BLDC سه فاز به‌کارگرفته شده به‌ترتیب در جدول ۱-۵ و ۲-۵ گنجانده شده است.

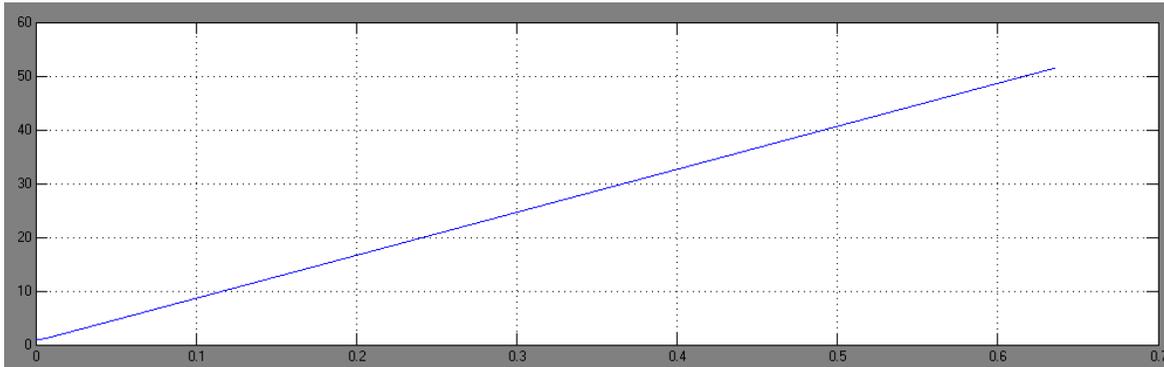
اولین گام در حلقه‌ی کنترل سرعت در این موتور یافتن موقعیت روتور می‌باشد، این پارامتر در بلوک‌های کنترل سرعت به طور مستقیم به‌کار گرفته می‌شود. در شکل ۱-۵ نحوه حرکت موتور یا تغییرات موقعیت روتور در موتور دوازده فاز آورده شده است. قابل مشاهده است که تغییرات حرکت روتور به صورت خطی می‌باشد، به عبارتی نوسانی در حرکت روتور ایجاد نمی‌شود این موضوع بدان معنی است که سرعت موتور نیز با اعوجاج کمی رخ خواهد داد. در ادامه این موضوع نیز از نظر خواهد گذشت.

جدول ۵-۱: مشخصات درایو موتور BLDC دوازده فاز

۰.۴(V.s/rad)	K_e	ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی
۰.۴(Nm.A ⁻¹)	K_t	ثابت گشتاور
۰.۰۰۰۲۶۶۶۷(H)	L	اندوکتانس خودی سیم پیچ های استاتور
۰.۰۰۰۰۶۶۶۷(H)	M	اندوکتانس متقابل سیم پیچ های استاتور
۱(Ω)	R	مقاومت معادل سیم پیچ های استاتور در هر فاز
۰.۰۰۰۵(Kg.m ^۲)	J	ممان اینرسی ارجاعی به شفت روتور
۰.۰۰۲(N.m.s/rad)	B	ثابت اصطکاک
۲۲۰(V)	V_{dc}	ولتاژ منبع DC
۰.۰۰۲	H.B	پهنای باند هیستریزیس

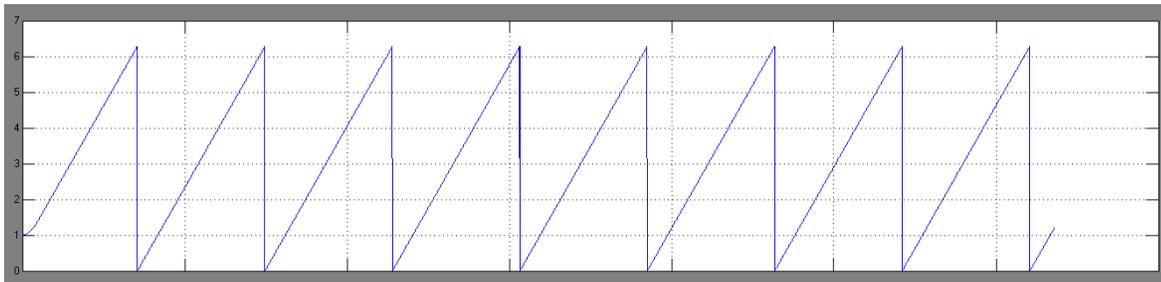
جدول ۵-۲: مشخصات موتور BLDC سه فاز

۰.۸۵(V.s/rad)	K_e	ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی
۰.۸۵(Nm.A ⁻¹)	K_t	ثابت گشتاور
۰.۰۰۰۱۴(H)	--	L_M
۰.۴(Ω)	R	مقاومت معادل سیم پیچ های استاتور در هر فاز
۰.۰۰۰۵(Kg.m ^۲)	J	ممان اینرسی ارجاعی به شفت روتور
۰.۰۰۲(N.m.s/rad)	B	ثابت اصطکاک
۲۲۰(V)	V_{dc}	ولتاژ منبع DC
۰.۰۰۲	H.B	پهنای باند هیستریزیس

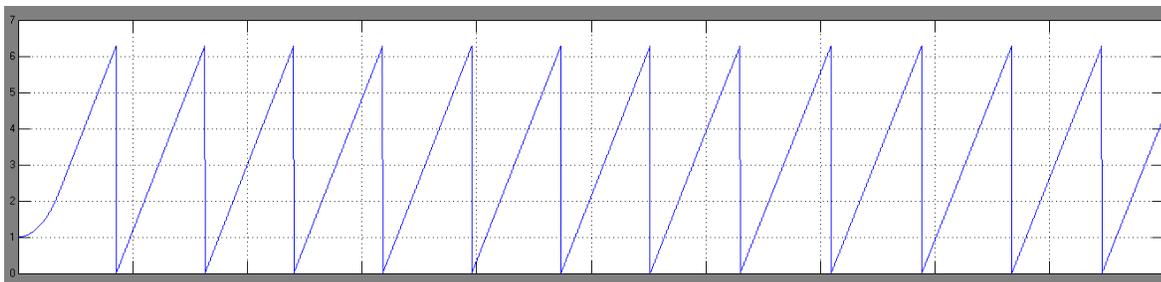


شکل ۵-۱: تغییرات موقعیت روتور

در استفاده از موقعیت روتور در محاسبه‌ی ولتاژهای $Bemf$ و جریان‌های مرجع می‌بایست این مقدار بین $0 - 2\pi$ محدود شود، شکل ۵-۲ تغییرات موقعیت روتور در موتور دوازده فاز و موتور سه فاز را در این محدوده نشان می‌دهد.



(a)



(b)

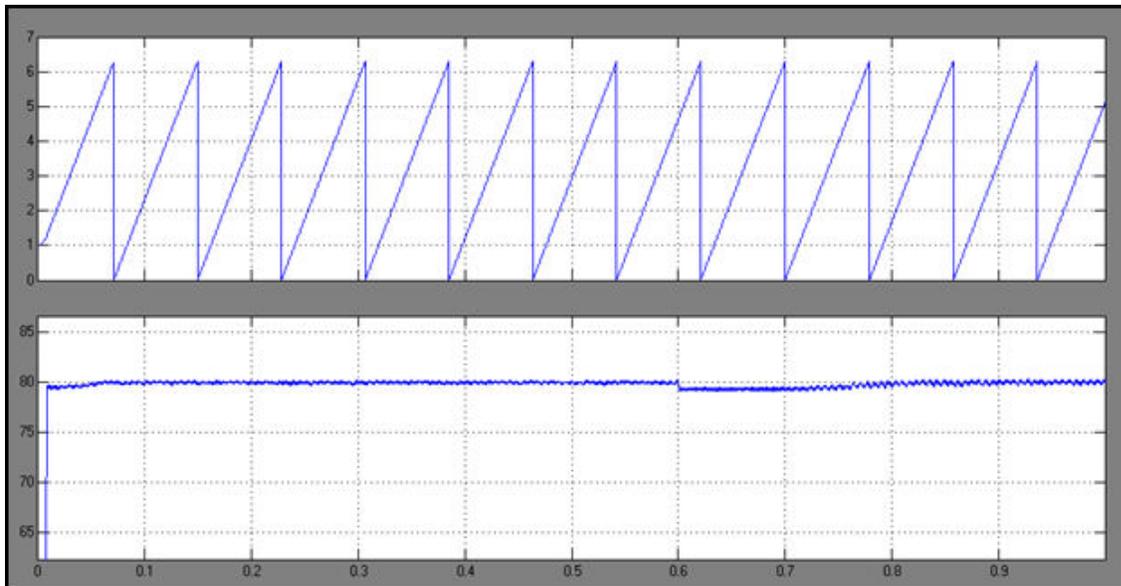
شکل ۵-۲: تغییرات موقعیت روتور در محدوده $0 - 2\pi$

(a) موتور ۱۲ فاز (b) موتور سه فاز

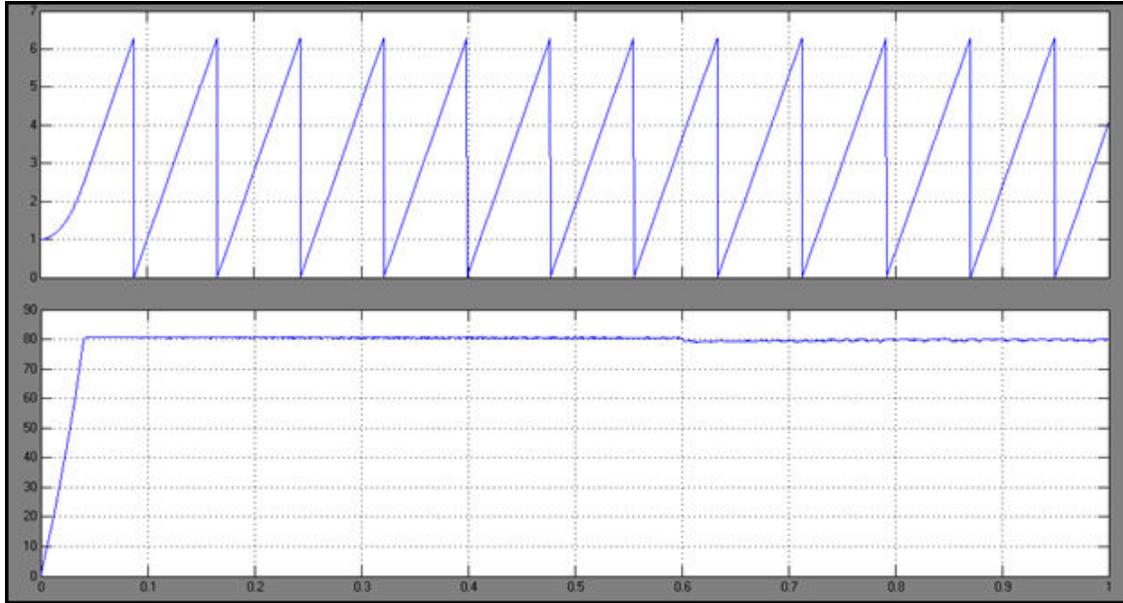
۵-۱: سرعت موتور

از اصلی ترین اهداف این پروژه کنترل سرعت در دو موتور مشابه BLDC دوازده فاز و سه فاز و مقایسه این پارامتر موتور در این دو موتور می باشد. در این مقایسه هدف، بررسی نوسانات سرعت در هر دو موتور می باشد. موتور از حالت سکون شروع به حرکت نموده و پس از سرعت گرفتن موتور حلقه‌ی کنترل سرعت در هر دو موتور به طور مجزا کنترل سرعت را به گونه‌ای انجام می دهند که موتور در سرعت مکانیکی مرجع مورد نظر حرکت نماید و به ثبات رسد. پس از گذشت ۰.۶ S گشتاور بار به صورت پله به موتور اعمال می شود.

صحت عملکرد حلقه‌ی کنترل سرعت این دو موتور در شکل ۵-۳ آورده شده است. در شکل ۵-۴ نیز در حالت عملکرد پایدار موتور، نوسانات سرعت مقایسه شده است.



(a)



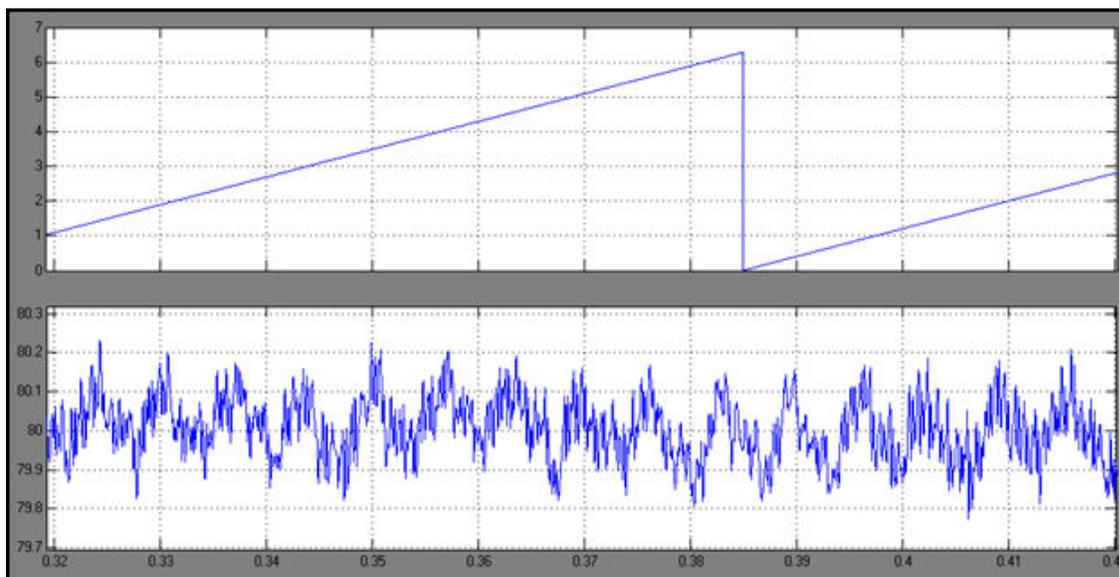
(b)

شکل ۳-۵: سرعت مکانیکی موتور

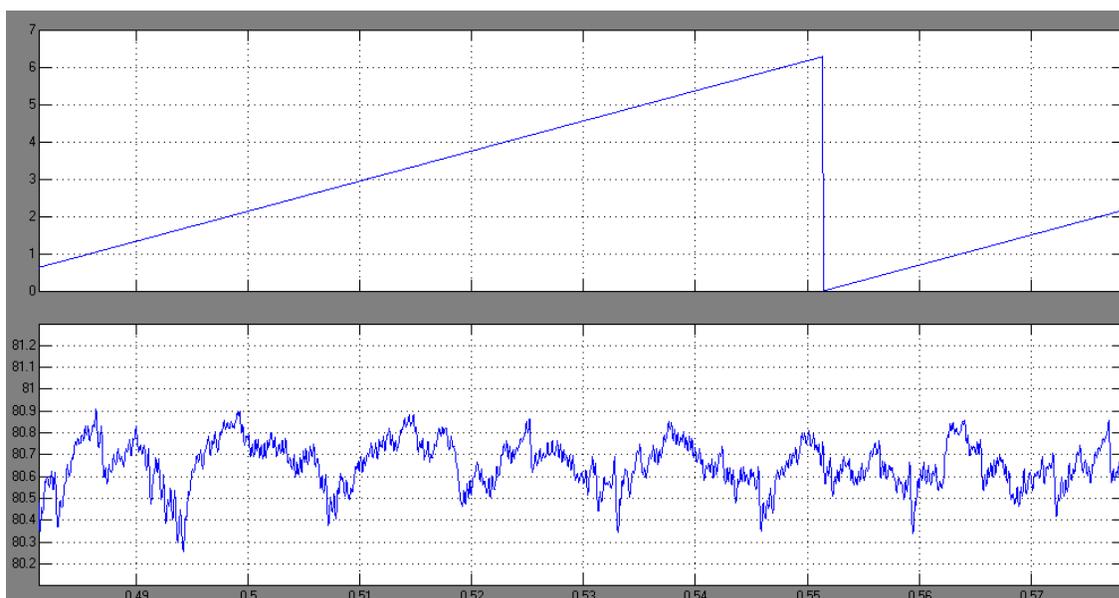
(a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز

همان‌گونه که در مزایای موتورهای چند فاز برشمرديم کاهش نوسان در گشتاور و سرعت از مهمترين اين موارد بوده است. اين برتری موتور های BLDC چند فاز در مقایسه با موتورهای BLDC سه فاز از عمده علل مورد توجه بودن این گونه از موتورهای BLDC می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۴-۵ می‌توان دنبال نمود؛ در موتور دوازده فاز نوسانات سرعت پیش از اعمال بار در حد 0.25 rad/s می‌باشد و این در حالی است که در موتور سه فاز این میزان در حد 0.45 rad/s می‌باشد.

در شکل ۵-۵ نوسانات سرعت در دو موتور پس از اعمال پله‌ی بار مقایسه شده که در این مقایسه نیز می‌توان کاهش نوسانات موتور BLDC دوازده فاز را در مقابل موتور BLDC سه فاز مشاهده نمود. میزان نوسانات در موتور دوازده فاز در حد 0.5 rad/s و در موتور سه فاز در حد 0.7 rad/s می‌باشد.



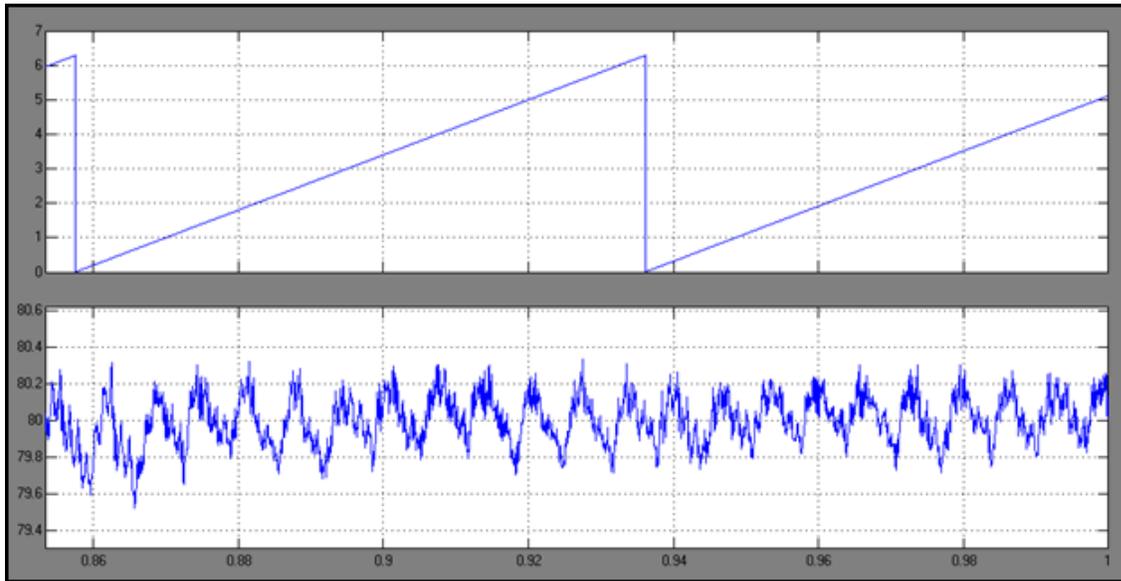
(a)



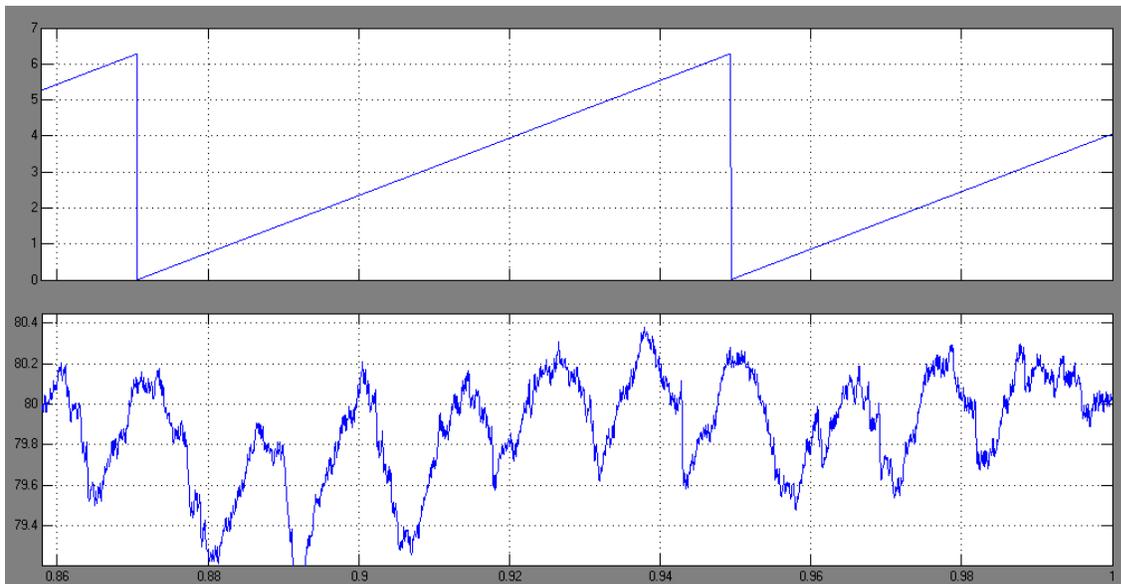
(b)

شکل ۵-۴: نوسانات سرعت موتور BLDC پیش از اعمال پله ی بار

(a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز



(a)

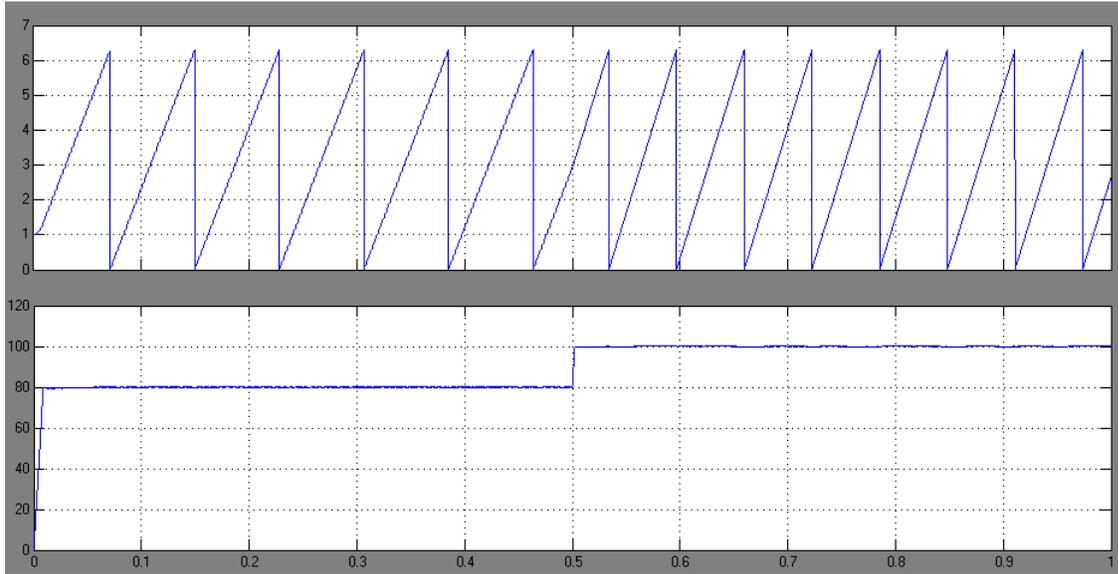


(b)

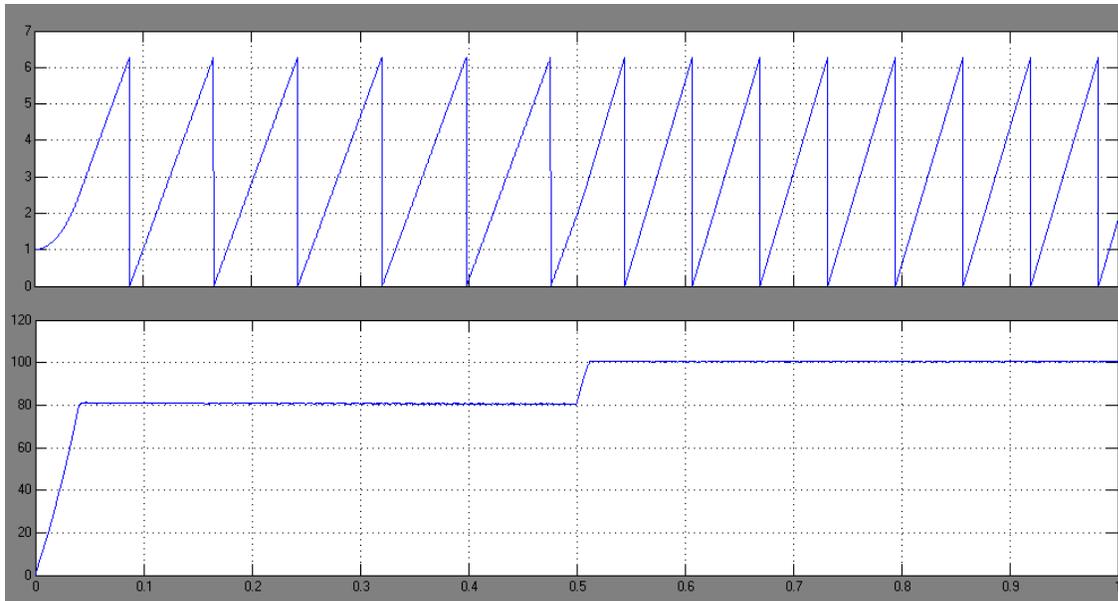
شکل ۵-۵: نوسانات سرعت موتور BLDC پس از اعمال پله ی بار

(a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز

به منظور بررسی عملکرد حلقه‌ی کنترل سرعت، پس از تغییر در سرعت مرجع موتور در زمان ۰.۵s تغییر سرعت مرجع جدید با مقدار 100 rad/s به وسیله پله‌ی سرعت اعمال شده و نتایج در شکل ۵-۶ آورده شده است.



(a)

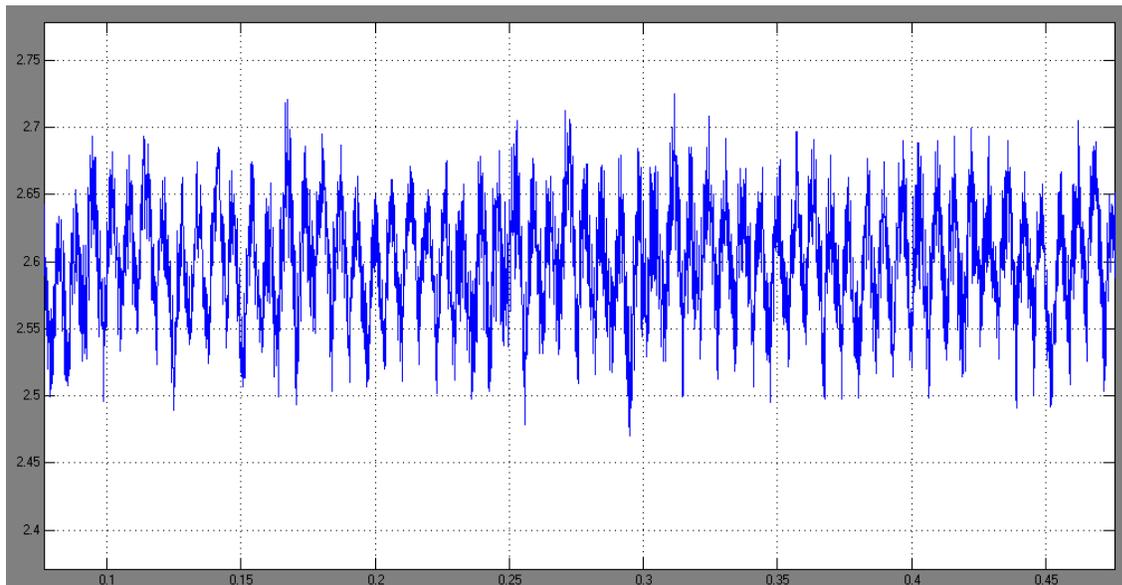


(b)

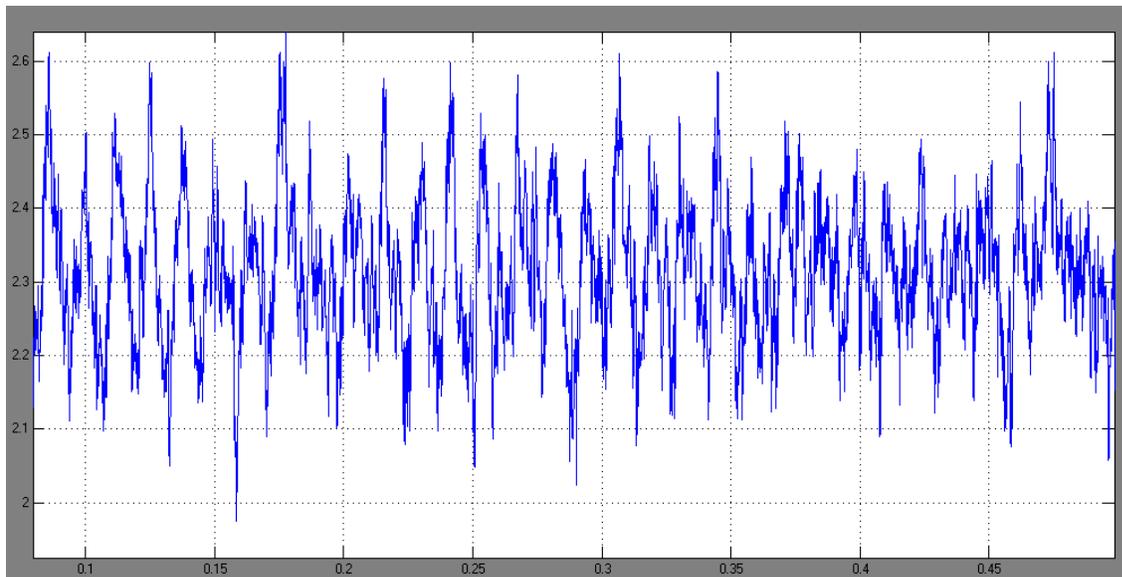
شکل ۵-۶: عملکرد حلقه‌ی کنترل سرعت موتور BLDC
 (a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز

۵-۲ گشتاور الکترومغناطیسی

در این قسمت گشتاور الکترومغناطیسی در دو موتور سه فاز و دوازده فاز ارائه می‌شود و سپس مقایسه‌ای در مقدار نوسانات آن‌ها را خواهیم داشت. در لحظه‌ی راه اندازی مقداری فرجه‌ش در گشتاور وجود دارد که این به دلیل گشتاور شتاب دهنده‌ی موتور ناشی از حلقه کنترل سرعت در ابتدای حرکت می‌باشد. در لحظه‌ی ۰.۶۸ گشتاور بار به صورت پله به موتور اعمال می‌شود. مقدار ریپل گشتاور موتور مورد نظر حدود ۰.۲ و نوسان گشتاور موتور BLDC سه فاز حدود ۰.۵ می‌باشد.



(a)



(b)

شکل ۵-۷: نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی در موتور BLDC
(a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز

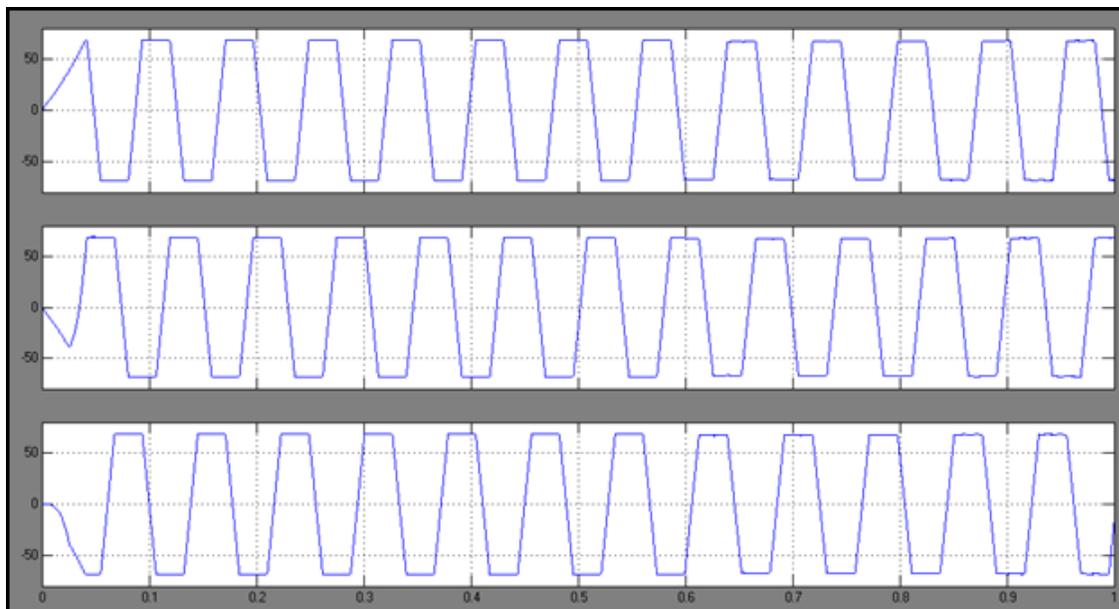
۵-۳ جریان استاتور و ولتاژ bEMF

در درایو موتورهای BLDC به دلیل استفاده از سوئیچ‌های قدرت، می‌باید که حداکثر تمهیدات در جهت افزایش طول عمر مفید استفاده از این ادوات و کاهش تلفات آن‌ها انجام شود، که البته این امر کاهش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت. یکی از راهکارهای اساسی در این راستا کاهش جریان عبوری از هر سوئیچ یا به عبارتی جریان عبوری در هر فاز استاتور حین عملکرد پیوسته ی موتور BLDC است. یکی دیگر از ویژگی‌های موتورهای BLDC چند فاز تحقق بخشیدن به همین موضوع است. به عبارتی کاهش جریان عبوری در هر فاز در این موتورها از شاخصه‌های عملکردی این موتورهاست.

در شکل ۵-۸ ابتدا ولتاژهای bEMF اعمالی به موتور BLDC نشان داده شده است و در شکل ۵-۹ جریان‌های استاتور مقایسه شده است. دامنه‌ی جریان استاتور در موتور دوازده فاز حدود ۱۱.۴ آمپر و در موتور سه فاز این مقدار حدود ۲.۵ آمپر می‌باشد.



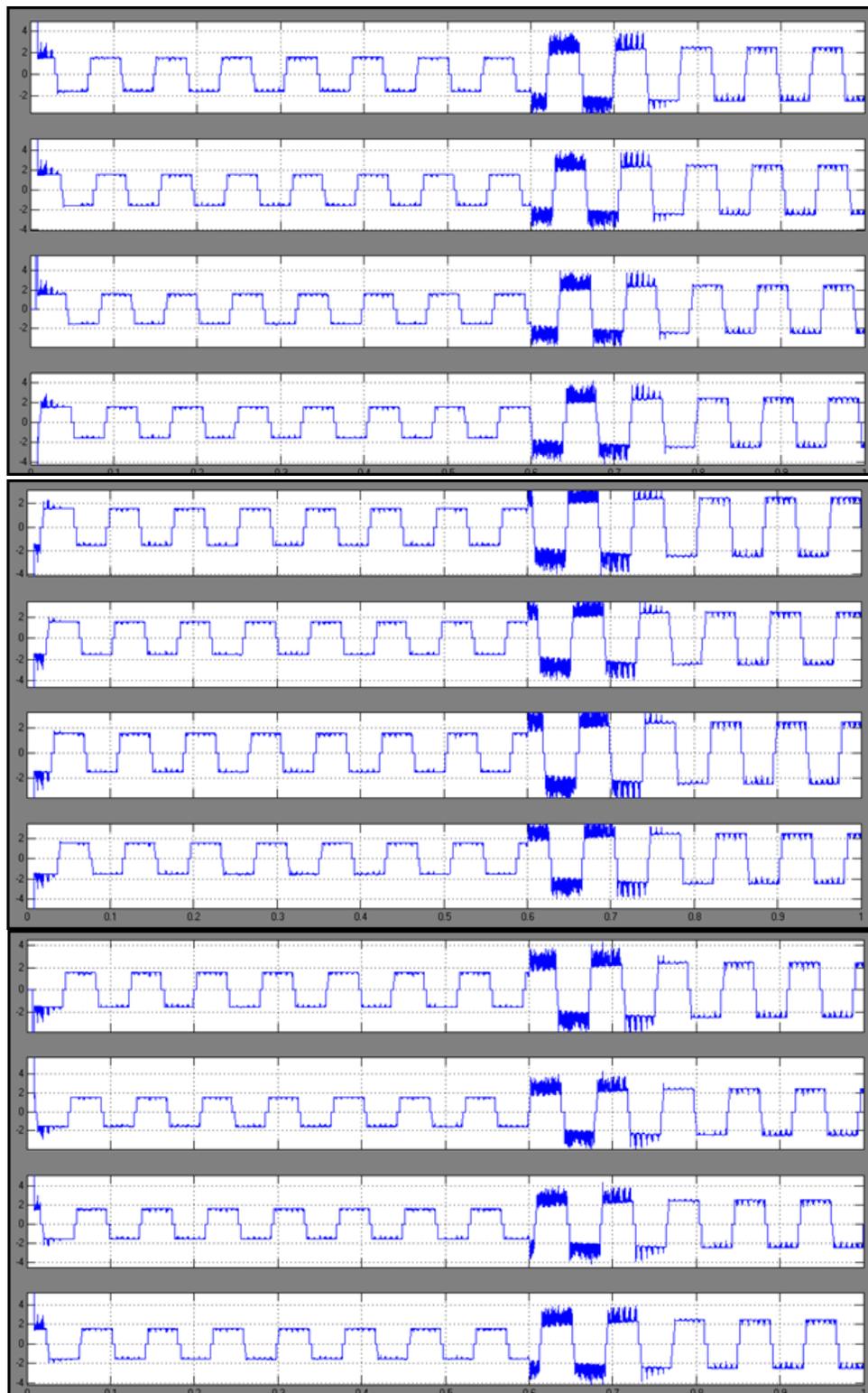
(a)



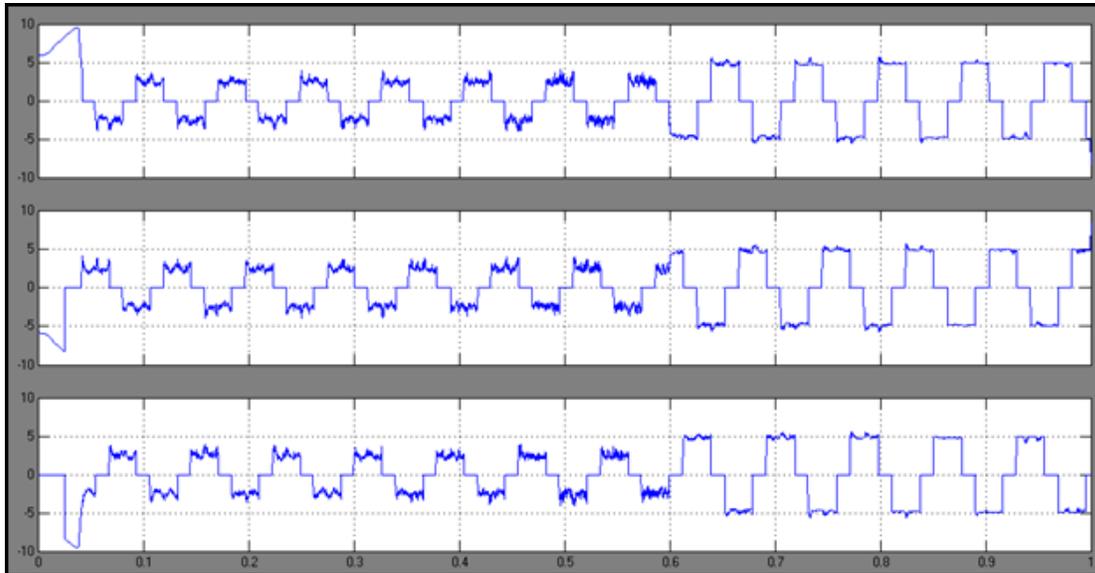
(b)

شکل ۵-۸: ولتاژهای bEMF

(a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز



(a)



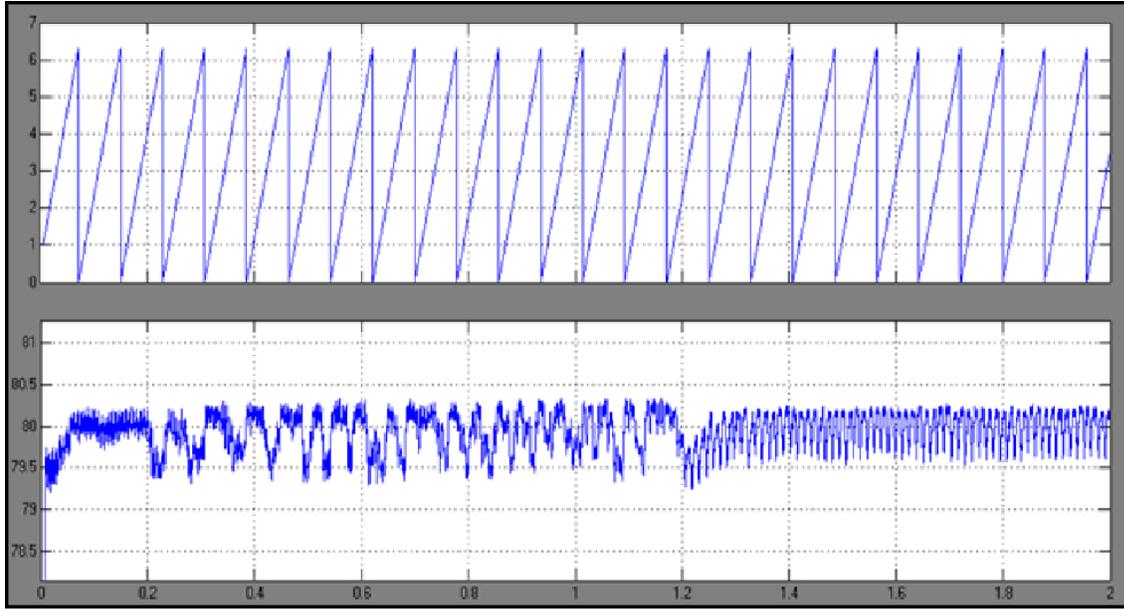
(b)

شکل ۵-۹: جریان استاتور

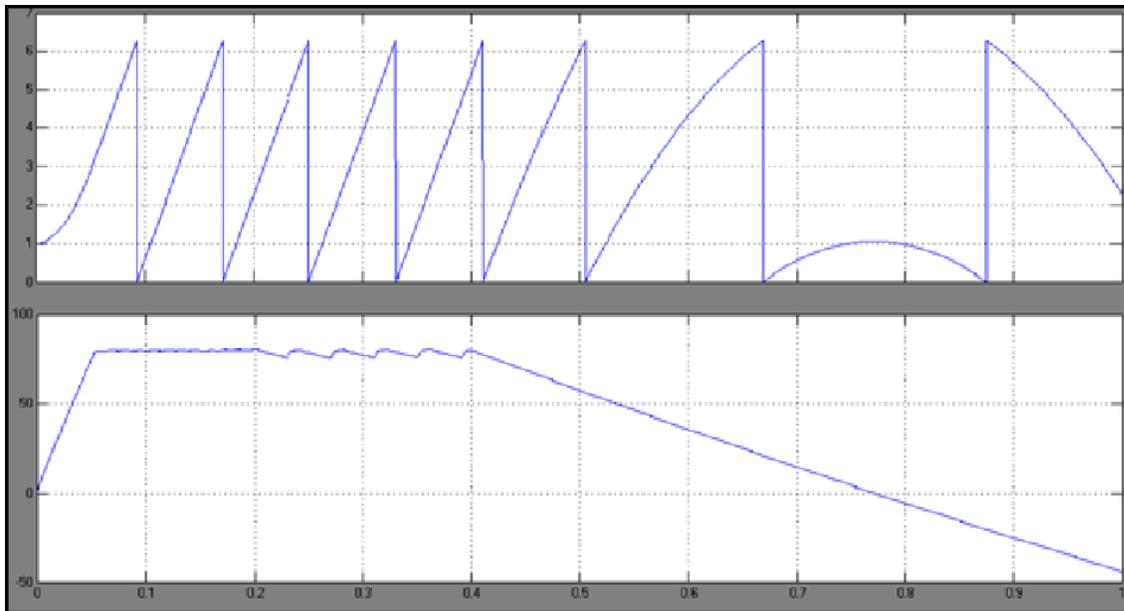
(a) موتور دوازده فاز (b) موتور سه فاز

۴-۵ قابلیت پایداری در برابر خطا

در این بخش به بررسی عملکرد موتور BLDC در برابر خطای فاز می‌پردازیم. این خطا از نوع مدار باز انتخاب شده به نحوی که پس از گذشت 0.2 s خارج نمودن یکی از فازهای ورودی به استاتور یا همان خروجی اینورتر رخ می‌دهد و پس از آن در فواصل زمانی یکنواخت، شش فاز مدار باز شده و آثار این تغییرات رصد می‌شود. البته در موتور BLDC سه فاز با از دست دادن دو فاز این عمل انجام گرفته است. انتظار داریم موتور BLDC دوازده فاز با توجه به ویژگی‌هایی که در فصول قبل برشمردیم رفتار بسیار مناسب‌تری در قبل این اتفاق از خود نشان دهد. در شکل ۵-۱۰ این موضوع مرور شده است.



(a)



(b)

شکل ۵-۱۰: خطای فاز در موتور BLDC

(a) موتور ۱۲ فاز (b) موتور سه فاز

در موتور سه فاز پس از اولین خطای فاز نوسانات سرعت بسیار بالاتر از حد مجاز بهره‌برداری موتور شده و پس از دومین خطای فاز سرعت موتور از سرعت مورد نظر فاصله گرفته و موتور دیگر شرایط کاری ندارد.

این در حالی است که در موتور BLDC دوازده فاز حتی پس از شش خطای فاز، نوسانات سرعت در حدی است که کارکرد آن را با خللی مواجه نمی‌سازد. این ویژگی موتورهای BLDC چند فاز را قادر می‌سازد عملکرد بدون وقفه ای در هنگام بروز خطا از خود نشان دهند. نتایج حاصل از شبیه سازی موتور BLDC دوازده در این فصل ویژگی‌های عملکردی موتورهای BLDC چندفاز را روشن تر ساخت و صحت برتری موتورهای چند فاز بر موتورهای سه فاز را تایید نمود.

فصل ششم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری

سرعت به کارگیری موتورهای BLDC سه فاز در صنایع مختلف چشمگیر است. در استفاده از این موتور کاهش نوسانات سرعت و گشتاور اهمیت بسزایی دارد. علی‌رغم خصوصیات برتری که موتورهای BLDC سه فاز نسبت به موتورهای مرسوم AC، DC دارا هستند ولیکن استفاده از این موتورها در صنایع حساس نیازمند تغییراتی در ساختار این موتورها به منظور بهبود شاخصه‌های عملکردی این موتور می‌باشد. موتورهای BLDC، چندفاز به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به موتورهای BLDC مرسوم دارد، بسیار مورد توجه واقع شده است. این ویژگی‌های چشمگیر سبب شده که این موتورها حتی در صنایع حساسی مثل صنایع نظامی یا صنایع هوانوردی نیز بکار گرفته شوند.

به دلیل اهمیت موتورهای BLDC چند فاز، در این پایان نامه به مقایسه‌ی عملکرد یک موتور BLDC

دوازده فاز و سه فاز پرداختیم که نتایج زیر در برتری موتورهای چند فاز حاصل گردید:

- ۱) کاهش نوسانات سرعت به میزان ۲۷٪
- ۲) کاهش نزدیک به ۵۰٪ در نوسانات گشتاور
- ۳) افزایش فرکانس نوسانات گشتاور
- ۴) کاهش دامنه‌ی جریان در هر فاز
- ۵) افزایش عملکرد بدون وقفه در مقابل خطای فاز

۶-۲ پیشنهادات

در این پایان نامه از روش کنترل جریان به منظور کنترل سرعت موتور استفاده شد و نتایج قابل توجهی حاصل گردید. این روش بدلیل کاهش حجم محاسبات و جلوگیری از پیچیده گی کنترل موتور چند فاز استفاده شده است. ممکن است با به کارگیری تکنیکهایی در پیاده سازی روش های ترکیبی، در کنترل موتور چند فاز، عملکرد این موتور را باز هم بهبود داد.

در درایو موتورهای BLDC، چند فاز بدلیل افزایش تعداد سوئیچ های قدرت در اینورتر، تلفات و قیمت تمام شده افزایش می یابد. بکار بستن راهکاری در جهت رفع این نقیصه می تواند زمینه ی پژوهشی مناسبی در درایو موتورهای BLDC چند فاز باشد.

مراجع:

- [۱] Pillay P., "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives", IEEE Transaction On Industry Application, Vol., ۲۷, No. ۵, ۱۹۹۱
- [۲] L.Xu, Wang, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control Scheme for PMSM in Super High Variable Speed Operation", Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, Vol. ۱, P.P ۴۸۳-۴۸۹, ۱۹۹۸
- [۳] Vilas Sant A. and Rajagopal K. R., "PM Synchronous Motor Speed Control Using Hybrid Fuzzy-PI With Novel Switching Functions", IEEE Transaction On Magnetics, Vol. ۴۵, No. ۱۰, ۲۰۰۹
- [۴] Villani M. Tursini M. Fabri G. Castellini L., "Multi-Phase Fault Tolerant Drives for Aircraft Applications", Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), University of L'Aquila, ۲۰۱۰.
- [۵] Kim T. Y., Lee B. K., Won C. Y., "Modeling and Simulation of Multiphase BLDC Motor Drive Systems for Autonomous Underwater Vehicles", Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '۰۷, IEEE International , ۲۰۰۷
- [۶] XIAO Xi., Yufei W., Jianyun C., Yongdong L., Xiangheng W., "Performance Analysis of Multi-phase PM Brushless DC Motor Drive System", Electrical Machines and Systems, Sixth International Conference on, ICEMS ۲۰۰۳.
- [۷] Pillay P., "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part ۱): The Brushless DC Motor Drive", IEEE Transaction On Industry Application, Vol. ۲۵, No. ۲, ۱۹۸۹
- [۸] Bianchi N., "Strategies for the Fault-Tolerant Current Control of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor", IEEE Transaction On Industry Application, Vol. ۴۳, No. ۴, ۲۰۰۷
- [۹] Olivieri C., Fabri G., Tursini M., "Sensorless Control of Five-Phase Brushless DC Motors", Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), First Symposium on , ۲۰۱۰.
- [۱۰] Kusko A. and Peeran S.M., "Definition of the Brushless DC", Kusko Electrical Division Failure Analysis Associates Westborough, MA, ۱۹۸۸
- [۱۱] Thiringer T., "BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab/Simulink Implementation", International masters program in Electric Power Engineering, ۲۰۰۵
- [۱۲] تاکاشی کنجو، شی جی نو بو ناکامورا، "موتور های بدون جاروبک، تئوری پیشرفته و کاربردهای آن"، مترجمین: مهندس مسعود تجلی پور، مهندس رامین تجلی پور، ۱۳۸۹
- [۱۳] Microchip Inc ,application Note., "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", ۲۰۰۳
- [۱۴] PILLAY P., "Modeling of Permanent Magnet Motor Drives" IEEE Transaction On Industrial Electronics, Vol. ۳۵, NO ۴, ۱۹۸۸
- [۱۵] Electrical and Computer Engineering University of Maine Orono, ME., Application Note , "Brushless Permanent Magnet Motor Design",
- [۱۶] Toliyat H. A., Shi R., Huangsheng Xu., "A DSP-Based Vector Control of Five-Phase Synchronous Reluctance Motor", Industry Applications Conference, Conference Record of the ۲۰۰۰ IEEE ,
- [۱۷] Toliyat H. A., Parsa L., "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives for Ship Propulsion Applications", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ۲۰۰۵

- [١٨] Neugebauer T. C., “A Six-Phase Multilevel Inverter for MEMS Electrostatic Induction Micromotors IEEE Transaction On Circuit And Systems—II: Express Briefs, VOL. ٥١, No. ٢, ٢٠٠٤
- [١٩] Franceschetti N., Simoes M. G., “A New Approach For Analysis, Modeling And Simulation Of Brushless Multiphase”, IEEE Industrial Electronics Society, ٢٠٠١
- [٢٠] Zabihi S., Zare F., “Active Power Filters with Unipolar Pulse Width Modulation to Reduce Switching Losses”, International Conference on Power System Technology, ٢٠٠٦
- [٢١] Baharuddin I., “Design And Development Of Unipolar Spwm Switching Pulses For Single Phase Full Bridge Inverter Application”, University Sains Malaysia, ٢٠٠٨
- [٢٢] Li D. and Ramos C., “Design Of High _Low Unipolar Pulse Width Modulation Inverter”, Electrical Engineering Department ,California Polytechnic State University, Spring ٢٠١٠.
- [٢٣] LEE B. K., “Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives”, *Electric Power Components and Systems*, ٢٠٠٣
- [٢٤] Pillay P., “Modeling of Permanent Magnet Motor Drives”, IEEE Transaction On Industry Application, Vol. ٣٥, No ٤, ١٩٨٨.
- [٢٥] Rajashekara K., Kawamura A., “Sensorless Control of Permanent Magnet AC Motors”, DeIco Remy, Electric Propulsion Systems, ١٩٩٤
- [٢٦] Johnson J. P., Ehsani M., Giizelginler Y., “Review of Sensorless Methods for Brushless DC”, Industry Applications Conference, . Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE , ١٩٩٩
- [٢٧] Kim T. H. and Ehsani M., “Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds”, IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. ١٩, No. ٦, ٢٠٠٤.
- [٢٨] Matsui N., “Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drives”, Industrial Electronics, Control, and Instrumentation,. Proceedings of the IECON '٩٣., International Conference on , ١٩٩٣
- [٢٩] Shen J. X., “Analyses and Compensation of Rotor Position Detection Error in Sensorless PM Brushless DC Motor Drives”, IEEE Transaction On Energy Conversion, Vol. ١٨, No. ١, ٢٠٠٣.
- [٣٠] Akcayol A., Cetin A., and Elmas C., “An Educational Tool for Fuzzy Logic-Controlled BDCM”, IEEE Transaction On Educational, Vol. ٤٥, No. ١, ٢٠٠٢.
- [٣١] Lemaitre, Patyra M. J., and Mlynek D., “Analysis and Design of CMOS Fuzzy Logic Controller in Current Mode”, IEEE Journal Of Solid-State Circuits, Vol. ٢٩, No. ٣, ١٩٩٤
- [٣٢] Aalerud K., “Brushless Direct Current Motor Control Using Sensorless Single-signal Feedback”, University Of Oslo Department of informatics, ٢٠٠٦
- [٣٣] Siong T. C., Ismail B., Siraj S. F., “Analysis of Fuzzy Logic Controller for Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives”, IEEE student Conference On Reaearch and Development, Dec ٢٠١٠
- [٣٤] Lotfi A. Zadeh “Is There a Need for Fuzzy Logic?”, Fuzzy Information Processing Society, Annual Meeting of the North American .NAFIPS ٢٠٠٨.
- [٣٥] Ahn S. C., Kim Y. H. and Kwon W. H., “Design of a Fuzzy Logic Controller Module for a Loop Controller”, Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Technology, ١٩٩٦

- [۳۶] Vilas Sant A. and Rajagopal K. R., "PM Synchronous Motor Speed Control Using Hybrid Fuzzy-PI With Novel Switching Functions", IEEE Transaction On Magnetics, Vol. ۴۵, No. ۱۰, ۲۰۰۹.
- [۳۷] Tang L., a Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive With Low Ripple in Torque and Flux—A Speed-Sensorless Approach", IEEE Transaction On Industry Application, Vol. ۳۹, No. ۶, ۲۰۰۳.
- [۳۸] Vas P., "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Monographs in Electrical and Electronic Engineering, ۱۹۹۲
- [۳۹] Baader U., Depenbrock M. and Gierse G., "Direct Self Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine: A Basis for Speed Control Without Speed Measurement", IEEE Transaction On Industry Application. ۲۸, No. ۳, ۱۹۹۲.
- [۴۰] Merzoug M. S. and Naceri F., "Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)", World Academy of Science, Engineering and Technology ۴۵, ۲۰۰۸
- [۴۱] Toliyat H., "Direct Torque Control Of Permanet Magnet Synchronous Motors With Non-Sinusoidal Back-EMF", Electrical Engineering, ۲۰۰۸
- [۴۲] حلویایی، "کنترل سرعت با اینورترهای فرکانسی"، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی برق، زمستان ۸۹
- [۴۳] Iqbal A. and Moinuddin S., "Comprehensive Relationship Between Carrier-Based PWM and Space Vector PWM in a Five-Phase VSI", IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. ۲۴, No. ۱۰, ۲۰۰۹.
- [۴۴] Kelly J. W., Strangas E. G., Miller J. M., "Multi-phase Inverter Analysis", Electrical and Computer Engineering, ۲۰۰۱
- [۴۵] Dujic D., Jones M., Levi E., "Space Vector PWM for Nine-Phase VSI with Sinusoidal Output Voltage Generation: Analysis and Implementation", The ۳۳rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Nov. ۵-۸, ۲۰۰۷
- [۴۶] Keyhani A., "Pulse-Width Modulation (PWM) Techniques", Department of Electrical and Computer Engineering The Ohio State University
- [۴۷] Rajashekara K., Kawamura A., "Sensorless Control of Permanent Magnet AC Motors, Department of Electrical Engineering, ۱۹۹۴
- [۴۸] Johnson J. P., Ehsani M., Giizelgiinler Y., "Review of Sensorless Methods for Brushless DC", Power Electronics Laboratory, ۱۹۹۹
- [۴۹] Parasiliti F., Petrella R., Tursini M., "Sensorless Speed Control of a PM Synchronous Motor by Sliding Mode Observer", Department of Electrical Engineering
- [۵۰] MOUSSI A., TORKI A., " An Improved Efficiency Permanet Magnet Brushless DC Motor PV Pumping System", *LARHYSS Journal*, N^o. ۰۱, Mai, ۲۰۰۲
- [۵۱] Park J. Y. and Lieu D. K., "Position Detection of Brushless DC Motor Using Inductance Bridge System", IEEE Transaction On Magnetics, Vol. ۳۹, No. ۵, ۲۰۰۳.
- [۵۲] Shan S., Qingfb L., Wei X., Xinghua W., " A Novel Starting Method for the Sensorless Salient-pole Brushless DC Motors", Xi'an Jiaotong University
- [۵۳] Lee W. J. and Sul S. K., " A New Starting Method of BLDC Motors Without Position Sensor", IEEE Transaction On Industry Application, Vol. ۴۲, No. ۶, ۲۰۰۶.